

Kim Juslin

HTL 25/70- ja XHTML 25/70 -hattuprofiilien lommahdusanalyysit

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

22.5.2014

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Kim Juslin HTL 25/70- ja XHTL 25/70 -hattuprofiilien lommahdusanalyysit 41 sivua + 4 liitettä 22.5.2014
Tutkinto	Insinööritutkinto
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotantotekniikka
Ohjaajat	Hallituksen puheenjohtaja Aulis Lundell Yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Työn tarkoituksena oli selvittää hattuprofiilien lommahduskestävyyttä sekä suorittaa testit kahdelle hattuprofiilityypille, sekä mekaanisesti että tietokonesimulaation avulla. Työ tehtiin Aulis Lundell Oy:n toimeksiantona. Työn taustalla on tarve standardoida tuotteita EU:n rakennustuoteasetuksen mukaisiksi.</p> <p>Työn suunnitteluvaiheessa selvitettiin aluksi testeille tarvittava testausstandardi, jota tarvitaan CE-merkintää varten.</p> <p>Hattuprofiileja varten suunniteltiin testauspenkki, jonka avulla voitiin toteuttaa mittauksia sekä pysty- että vaakasuunnassa ja selvittää profiilin lommahduskestävyyttä kyseisissä kuormitus suunnissa. Hattuprofiileista tehtiin myös tietokone mallit Dassault Systems Abaqus FEA-tietokonesimuulaatio-ohjelmalla. Ohjelmalla suoritettiin simulaatioita hattuprofiileille ja tuloksena saatiin ohjelman laskema lommahdusvoima kyseiselle profiilille.</p> <p>Työn tuloksena saatiin testausstandardi hattuprofiilien testausta varten ja mittaustulokset sekä mekaanisesta testaamisesta että tietokonesimulaatiosta. Näitä tuloksia arvioitiin keskenään ja tehtiin havaintoja tuloksista. Havaintojen perusteella voitiin todeta että testauspenkillä suoritettut testit vastaavat tietokonesimulaation tuloksia.</p>	
Avainsanat	hattuprofiili, lommahdus, testauspenkki, tietokonesimulaatio

Author Title Number of Pages Date	Kim Juslin Buckling Analyses of HTL 25/70 and XHTML 25/70 Omega Profiles 41 pages + 4 appendices 22 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering and Production Technology
Specialisation option	Production Technology
Instructors	Aulis Lundell, Chairman of the board Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to design and construct a test bench for the buckling analyses of omega profiles and to conduct tests for two omega profile types both mechanically and through computer simulations. The project was commissioned by Aulis Lundell Oy. The background of this thesis was the need to standardize products according to the EU Construction Products Regulation.</p> <p>The project work began with the finding of a standard for the tests. A testing standard was required for CE marking.</p> <p>A test bench for the testing of omega profiles was designed and constructed. The testing bench allowed the testing of buckling strength of the omega profiles both horizontally and vertically. Computer models of the omega profiles were created with the Dassault Systems Abaqus FEA computer simulation program. Simulations were run on these models. As a result, computer calculated values of buckling strength for the omega profiles were created.</p> <p>The project resulted in a testing standard, a completed test bench and testing results of two profile types. These results were compared to the results from computer simulations made with the Dassault Systems Abaqus FEA program. It was discovered that the mechanical testing and the computer simulation could be found similar.</p>	
Keywords	omega profile, buckling, test bench, computer simulation

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Hattuprofiili	1
1.2	Valmistusmenetelmät	5
1.2.1	Rullamuovaus	5
1.2.2	Särmäys	6
1.3	Vaurioitumistapoja	7
1.4	Työn tavoite	7
2	Standardi	9
2.1	Testaus standardin selvittäminen ja valinta	9
2.2	Eurocode 3 EN 1993-1-3	10
3	Testausmenetelmät	12
3.1	Mekaaninen testaus	12
3.2	Tietokonesimulaatio	17
4	Testaus	19
4.1	Mekaaninen testaus	19
4.2	Simulaatio	22
5	Mittaustulokset	23
5.1	Testauksen tulokset	23
5.1.1	HTL 25/70 -hattuprofiili	24
5.1.2	XHTL 25/70 Xelent -hattuprofiiliruode	26
5.2	Simulaation tulokset	30
6	Tulosten arviointi ja vertailu	31
6.1	HTL 25/70 -hattuprofiilin mittaustulosten arvio ja vertailu	31
6.2	XHTL 25/70 Xelent -hattuprofiiliruoteen mittaustulosten arviointi ja vertailu	34
7	Yhteenveto	38
7.1	Työn tulokset	38
7.2	Työn arviointi	39

Liitteet

Liite 1. Aulis Lundell Oy:n Lundell – EKO – PRO -ulkoseinä

Liite 2. Hattutestilaitteen kokoonpanokuvat

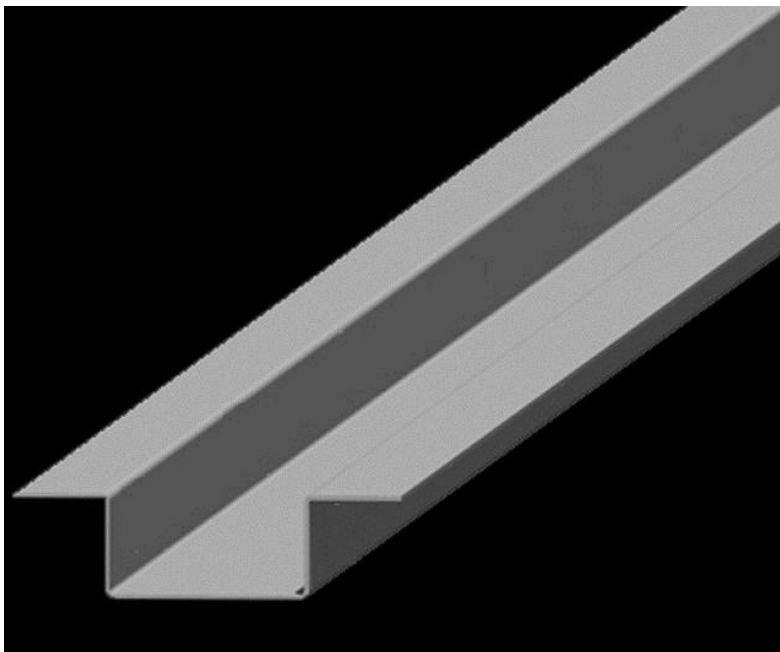
Liite 3. Ohjeet Abaqus-simulaation luomiseen

Liite 4. Mittauspöytäkirjat

1 Johdanto

1.1 Hattuprofiili

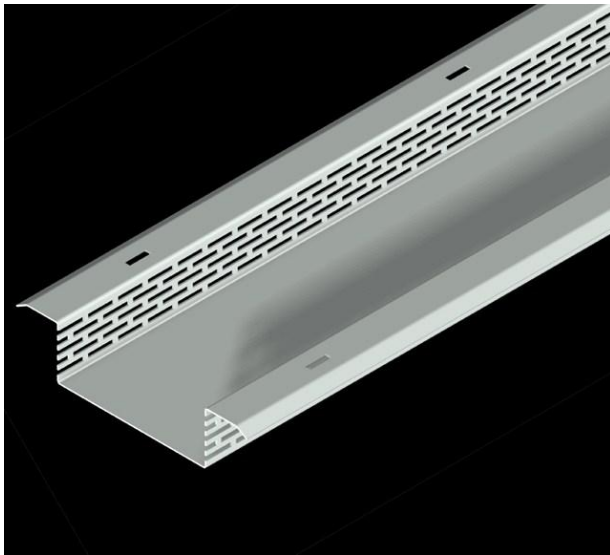
Hattuprofiililla (myös hattulista) tarkoitetaan kuvan 1 mallista sileästä teräslevystä valmistettua profiilia, jonka poikkipinta-ala muistuttaa paperille piirrettyä hattua. Hattuprofiilityyppejä on myös erilaisia. Kuvassa 2 on rei'itetty ns. ruodelista. Kuvassa 3 puolestaan on Aulis Lundell Oy:n patentoima hattulistaruode Xelent rei'ityksellä. Ruodelistan ominaisuutena on antaa rakenteelle hyvä tuulettuvuuden sekä kylmäsilan katkaisun ominaisuus. Tämä tarkoittaa, että lämpö ei pääse johtumaan ulos samalla tavalla kuin sileässä teräsrakenteessa. On myös palokatko-rei'itettyä listaa (kuva 4) jonka ominaisuutena on paloa hidastavat katkot. Hattulistaprofiilien poikkipinta mitat ja ainevahvuudet vaihtelevat käyttötarkoituksesta riippuen. Myös hattulistan materiaali vaihtelee käyttötarkoituksesta riippuen. Esimerkiksi kantavissa rakenteissa käytetään teräslaatua S350 ja rakenteissa joissa profiilien kantavuus ei ole kriittinen voidaan puolestaan käyttää niin sanottuja luokittelemattomia teräslatuja, kuten esimerkiksi teräslaatua, josta käytetään merkintää DX51.



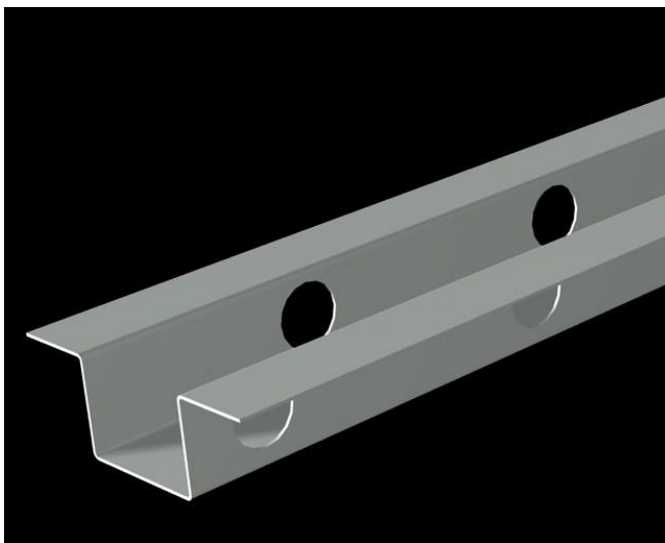
Kuva 1 Hattuprofiili



Kuva 2 Ruodehattuprofiili



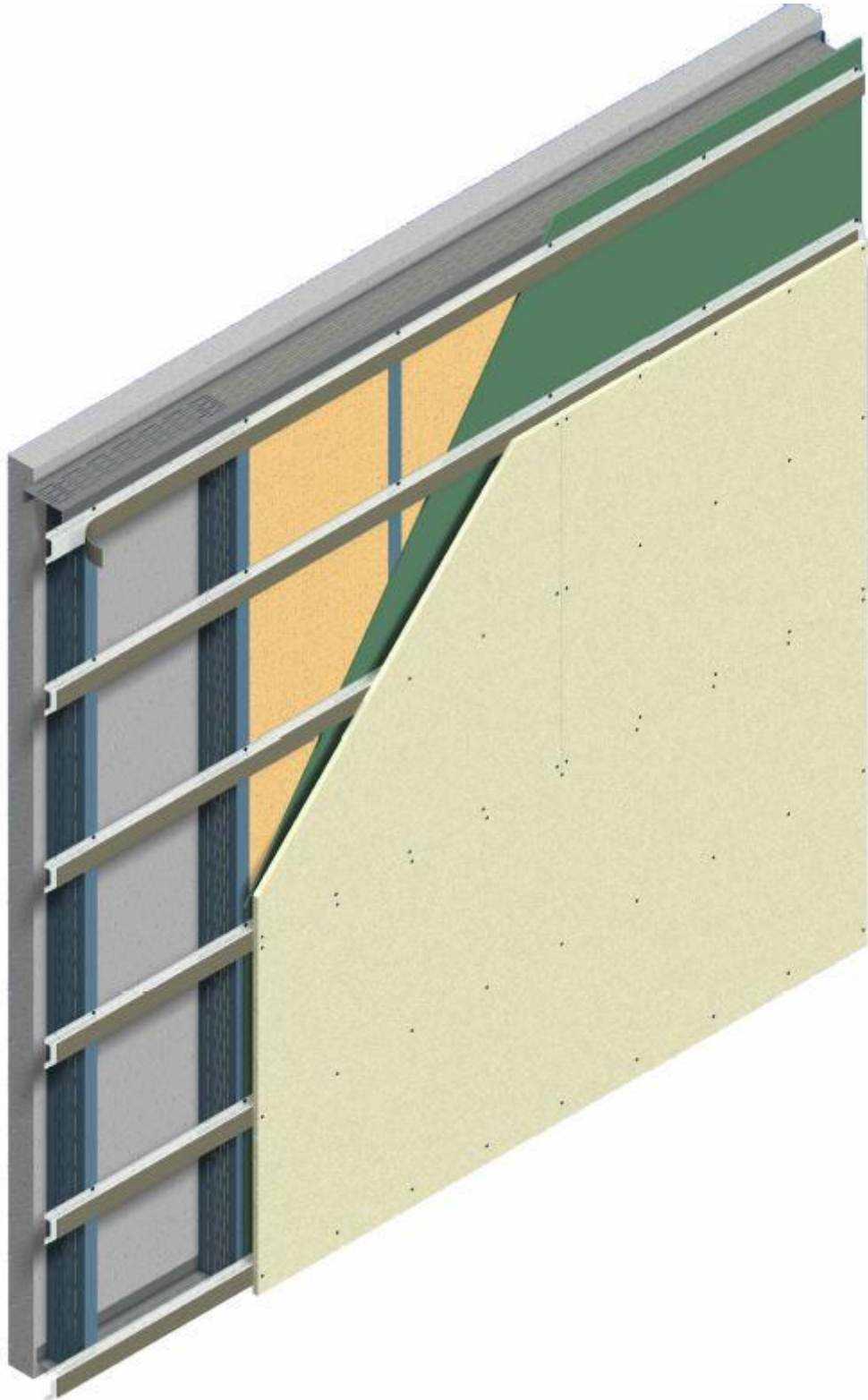
Kuva 3 XHTL-ruodehattuprofiili Xelent rei'ityksellä



Kuva 4 Palokatko

Hattulistaa käytetään yleensä erilaisiin koolauksiin sisä- ja ulkorakenteissa. Muita käyttökohteita ovat julkisivusaneeraukset ja katemateriaalin ruoteet. Rullamuovaustekniikalla valmistettavat hattulistat ja ruoteet rakenteiden eri tarpeisiin valmistetaan kuumasinkitystä teräsohutlevystä. Tässä insinööriyössä keskitytään hattulistan käyttöön sisä- ja ulkorakenteessa.

Hattulistan käyttöä ulkorakenteissa on esitetty kuvassa 5. Siinä on hattulistaruoetta käytetty alustana tuulettuvalle ja kantamattomalle rappausjärjestelmälle. Kyseessä on Aulis Lundell Oy:n Lundell – EKO – PRO -ulkoseinäjärjestelmä. Järjestelmä koostuu rapattuun seinään ankkuroitavasta termoranka ja -kiskorakenteesta. Kiskorakenteen väliin on asetettu eristeet. Rakenteen päälle on ruuvattu tuulensuojalevy. Tuulensuojalevyn päälle puolestaan on asennettu ruodehattulista. Tämän opinnäytetyön liitteestä 1 löytyy myös kyseinen järjestelmä tarkemmin esitettynä. Järjestelmässä käytetty hattuprofiili on Aulis Lundell Oy:n patentoima XHTML 25/70 x 0,7 -ruodeprofiili Xelent rei'ityksellä. Hattulista puolestaan kantaa levyä, joka on kiinnitetty ruuveilla. Hattuprofiiliruoteen ansiosta järjestelmä pääsee paremmin tuulettumaan, eikä kylmäsiltoja pääse syntymään. Aulis Lundellin [11.4.2014] mukaan *"hattuprofiileja voidaan periaatteessa käyttää missä tahansa seinä-, katto- tai lattiasovelluksissa, kaikki tosin riippuu käyttökohteesta ja siitä, onko hattuprofiilin käyttö järkevää kyseisessä käyttökohteessa."*



Kuva 5 Julkisivun saneerausjärjestelmä

1.2 Valmistusmenetelmät

1.2.1 Rullamuovaus

Ohutlevyteräsprofiilit valmistetaan rullamuovaamalla tai särmäämällä. Aulis Lundell Oy:n pääasiallisena tuotantomenetelmänä on rullamuovaaminen, joskin pieniä eriä voidaan poikkeustapauksissa valmistaa särmäämällä. Rullamuovaus on jatkuvan taivutuksen toimenpide, jossa pitkä liuska peltiä (tavallisesti kelattua terästä) kulkee läpi sarjan rullapareja. Jokainen näistä rullapareista suorittaa vähäisen osan taivutuksesta, kunnes profiilille on saatu haluttu poikkileikkaus. Rullamuovauksen etuna on sen nopeus ja soveltuvuus valmistamaan lähes rajattoman pituisia ja valmistusmäärältään suuria määriä vakioprofiileja. Menetelmän toistotarkkuus on myös huomattavasti parempi kuin särmäyksessä.

Rullamuovausmenetelmällä voidaan valmistaa poikkileikkaukseltaan monenlaisia profiileja, mutta jokaisen profiilin valmistukseen tarvitaan tarkasti tehdyt rullasarjat. Rullamuovausprosessi kuuluu yksinkertaisimpiin valmistusprosesseihin. Prosessi alkaa tyypillisesti suuresta kelasta peltiä. Pelti on tavallisesti noin 100–360 mm leveää ja noin 0,5–2,5 mm paksua. (Kyseiset peltirainaleveydet ja -paksuudet ovat Aulis Lundell Oy:n käyttämiä, joten ne saattavat poiketa muiden rullamuovausmenetelmää harjoittavien valmistajien käyttämistä arvoista.) Peltikela on ripustettu kelan purkulaitteeseen, joka syöttää peltirainaa aluksi ohjurin läpi. Ohjurin tehtävänä on keskittää peltiraina keskelle rullapareja, jotta profiilin poikkileikkausmitat pysyvät kohdallaan. Rullaparit muovaavat peltirainaa vähän kerrallaan, kunnes haluttu muoto on saavutettu. Rullasarja asennetaan tavallisesti toinen toisensa päälle kahdelle vaakasuorassa olevalle akselille, joita puolestaan tuetaan asemilla. Joissain sovelluksissa voidaan myös käyttää sivurullia ja rullastoja, jotta päästään parempaan tarkkuuteen ja joustavuuteen sekä pienentämään muovattavaan materiaaliin kohdistuvia rasituksia.

Muovatun peltirainan pituusleikkaus voidaan suorittaa ennen kuin raina kulkee rullien läpi, rainan ollessa rulla-asemien välissä tai valmiin profiilin tullessa ulos viimeisen rullaparin jälkeen.

Ruodehattuprofiiliin tehtävä rei'itys tehdään joko epäkeskopuristimella tai sitten rullamuovauskoneen eteen sijoitettavalla pyörivällä rei'ittimellä. Epäkeskopuristimella suoritettava rei'itys joudutaan tekemään erillisenä työnvaiheena, koska puristimen iskutahti

ei ole riittävän nopea rullamuovauslinjalle. Näin ollen raina on ensiksi purettava ja ajettava epäkeskopuristimen läpi, ja uudelleen kelattava takaisin rainakelaksi. Pyörivällä rei'ittimellä tämä ei muodostu ongelmaksi, koska rei'ittimen nopeus mukautuu rullamuovauskoneen nopeuteen ja näin se voidaan sijoittaa rullamuovauskoneen eteen. Epäkeskopuristimen etuna puolestaan on että sillä pystytään suorittamaan rei'ityksiä, joita ei voida suorittaa pyörivällä rei'ittimellä. Esimerkkinä tästä ovat ympyrän muotoisten reikien rei'itys.

1.2.2 Särmäys

Särmäys on rullamuovauksen ohella toinen profiilin valmistusmenetelmä. Särmäyksessä työstettävä peltiraina asennetaan muotoilutyökalun päälle, joka puristaa kyseisen kappaleen haluttuun muotoon. Tavallisesti taivutuksessa on ylitettävä työstettävän pellin vetojännitys ja puristusjännitys. Kun taivutus on suoritettu, pyrkii materiaali jäljellä olevista jännityksistä johtuen ”ponnahtamaan” takaisin kohti alkuperäistä muotoaan. Tämän takia särmäyksessä joudutaan ylitaivuttamaan työstettävää peltiä, jotta haluttu taivutuskulma saadaan tehtyä. Materiaalin takaisin ponnahtaus riippuu työstettävästä materiaalista sekä siitä minkätyyppisestä taivutuksesta on kysymys. Pellin taivutuksen ollessa kyseessä materiaali venyy pituutta.

Särmäyksellä saavutetaan rullamuovaukseen nähden nopea asetus aika pienten erien valmistuksessa. Särmäyksen käyttöä valmistuksessa rajoittaa särmäyspuristimen koko, taivutusnopeus sekä taivutusten määrästä työstettävässä kappaleessa. Särmäyspuristimen koko rajoittaa työstettävän kappaleen pituutta laitteen sallimaan pituuteen. Tämä tarkoittaa, että laitteella ei voida valmistaa kyseistä pituutta pitempiä kappaleita. Tämä pituus on yleensä 4–6 m riippuen laitteen koosta. Toinen rajoittava tekijä on laitteen taivutusnopeus, koska se pysyy aina samana. Puristimella voidaan siis särmätä yhtä nopeasti 4 m:n ja 1 m:n pituinen profiili. Myös taivutusten määrä on tekijä, joka tulee ottaa huomioon valmistusmenetelmää suunniteltaessa. Yhden kappaleen valmistusaika kaksinkertaistuu, jos taivutusten määrä kaksinkertaistuu. Tästä voidaan ottaa esimerkiksi hattuprofiilin särmäys. Hattuprofiili vaatii neljä taivutusta, joten valmistusaika on nelinkertainen verrattuna yhden taivutuksen profiiliin nähden.

1.3 Vaurioitumistapoja

Hattuprofiilin vaurioituminen johtuu sen stabiliteetin menettämisestä. Stabiliteetin menettämistapoja ovat nurjahdus, lommahdus ja kiepahdus. Stabiliteetilla tarkoitetaan *”rakenteen kykyä kantaa määrätty kuorma ilman äkillistä tasapainon menetystä ja siitä johtuvaa muodonmuutosta”*. [Lujuusoppi 2006, 411.] Stabiliteetin menettäminen on ainoastaan puristettujen rakenneosien ongelma. Tämä tarkoittaa, että vedetyillä rakenteilla kyseistä ongelmaa ei ole.

Nurjahduksessa puristettu pilari taipuu äkisti sivulle ja menettää kantokykynsä. Tuenalla on iso merkitys nurjahduskuormaan. Nurjahduskuorman määrittäminen perustuu nurjahduksen differentiaaliyhtälön ratkaisuun. Perustapauksiin on johdettu valmiiksi ratkaisukaava, jota voidaan käyttää.

Kiepahduksessa taivutettu palkki kiertyy pituusakselinsa ympäri ja kallistuu äkisti sivulle. Sitä voisi kuvata palkin puristetun osan nurjahtamiseksi. Korkeat ja kapeat palkit ovat kiepahdusalttiita. Kiepahdus voidaan estää, jos palkki on tuettu sivusuunnassa riittävästi. Ympyrän- ja neliönmuotoiset poikkileikkaukset eivät ole kiepahdusalttiita.

Lommahdus tarkoittaa puolestaan puristetun rakenneosan paikallista nurjahdusta. Lommahduksessa puristettu levymainen rakenneosa pullahtaa äkisti sivulle. Lommahdusilmiö on ohuiden levyrakenteiden ongelma. Tämä tarkoittaa, että lommahdus on tapa, jolla hattuprofiili menettää stabiliteettin, koska hattuprofiili koostuu muotoon muovatusta ohutlevystä.

1.4 Työn tavoite

Tämän insinööritoimen aiheena on hattulistaprofiilin lommahdustestit. Insinööritoime suoritettiin Aulis Lundell Oy:n toimeksiantona.

Insinööritoimen tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa hattuprofiileille testi, jonka avulla saadaan mitattua profiilin lommahduskestävyyttä sekä poikittaisessa että kohtisuorassa kuormituksessa. Hattulistoja käytetään yleensä ei-kantavissa väliseinäsovelluksissa kannattelemassa levyjä. Tässä insinööritoimessa keskitytäänkin juuri tähän sovellukseen. Siinä hattulistaan kohdistuu levyn aiheuttama poikittainen kuormitus ja huoneen mah-

dollisista paine-eroista syntyvä tuulikuorma, joka kohdistuu kohtisuoraan seinää vasten.

Tässä insinööriyössä käydään aluksi läpi hattulistojen testaukseen valitun standardin selvitystä ja valintaa. Tämän jälkeen tutustutaan itse mekaaniseen testaukseen ja tietokonesimulaatioon. Mekaanisessa testauksessa käydään läpi testauslaitteiston suunnittelu, valmistus ja koetestaus. Tietokonesimulaatiossa puolestaan tutustutaan Abaqus FEM-ohjelmaan, simulaatiomallin luomiseen ja koesimulaatioon. Kun on käyty läpi käytettävät menetelmät, siirrytään itse testeihin ja simulaatioihin. Testejä suoritetaan kahdelle eri hattuprofiilille. Testien jälkeen kerätään ja kootaan mittauksissa saadut tulokset ja lopuksi mittaustulokset arvioidaan ja tehdään päätelmiä saaduista tuloksista.

Hattuprofiileista sekä niiden kestävyydestä ei löydy juurikaan kirjallista tietoa, joten suurin osa tämän insinööriyön tiedoista on kerätty haastatteleamalla Aulis Lundell Oy:n perustajaa ja hallituksen puheenjohtajaa Aulis Lundellia.

Opinnäytetyön taustalla on tarve standardoida ja CE-merkitä tuotteita ja tuotantomenetelmiä. Tämän tarpeen taustalla on EU:n rakennustuoteasetus joka astui kokonaisuudessaan voimaan 1.7.2013. [EU N:o 305/2011]

Työn lopputuloksena on tarkoitus valmistaa testipenkki, jonka avulla voidaan suorittaa testejä hattuprofiileille. Testin tuloksia on tarkoitus verrata tietokonesimulaatiosta saattuihin tuloksiin.

2 Standardi

2.1 Testaus standardin selvittäminen ja valinta

Jotta hattulistoille suoritettavat testit tehdään oikein ja ne myös voidaan osoittaa oikein tehdyksi, tulee testeillä olla testaus standardi, jonka mukaan testit suoritetaan. Standardien avulla lisätään turvallisuutta ja järjeistetään jokapäiväistä toimintaa. Standardisoimalla tuote, palvelu tai menetelmä varmistetaan, että ne sopivat siihen käyttöön ja niihin olosuhteisiin, joihin ne on tarkoitettu. Standardin ansiosta voidaan varmistua, että tuotteet ja järjestelmät sopivat toisiinsa ja toimivat yhdessä. Kun tuote on valmistettu standardin mukaisesti, se hyväksytään kansainvälisille markkinoille. Standardi siis poistaa kaupan esteitä. Maailmasta löytyy monenlaisia standardeja. Näitä ovat mm. paperi- ja kirjekuorikoot, vaate- ja jalkinekoot, elintarvikepakkaukset, ruuvit, mutterit ja monet muut. Kaikenlainen valmistus, rakentaminen sekä asennus-, korjaus- ja huoltotyöt tehdään standardien vaatimalla tavalla ja niiden vaatimusten mukaisesti. Tämän lisäksi standardeja tarvitaan järjestelmien, laitteiden ja laitteistojen käytössä sekä prosessien toiminnassa ja ylläpidossa.

Sopivan testaus standardin selvitystyö aloitettiin projektin alkuvaiheessa. Tämä johtuu siitä, että arvioitiin kyseisen selvitystyön vievän oman aikansa, ja koska testaus standardi tulisi määrittämään, kuinka testit tulee suorittaa. Ensiksi selvitettiin, mitä testaus standardeja yrityksessä oli aikaisemmin käytetty tuotteiden testaamisessa. Tämän jälkeen aloitettiin sopivan testaus standardin etsiminen SFS-Online -palvelun kautta eli Suomen Standardisoimisliiton verkkokaupasta. Tavallisesti kyseisessä verkkopalvelussa ei tosin pääse ilman lisenssiä tarkemmin tutustumaan standardien sisältöön. Tässä asiassa auttoi Metropolia Ammattikorkeakoulun hankkimat verkkolisenssit, joiden avulla opiskelija pääsee ilmaiseksi tutustumaan kaikkiin lisenssin kattaviin standardeihin.

Standardia selvittäessä otettiin myös yhteyttä Teräsrakenneyhdistykseen. Teräsrakenneyhdistys on suomalainen yhdistys, jonka toiminta-ajatuksena on teräksen ja muiden metallien käytön edistäminen rakentamisessa ja alan kotimaisen kehittäminen. Teräsrakenneyhdistyksestä ohjattiin tarkastelemaan harmonisoituja tuotestandardeja. Harmonisoitua tuotestandardia tarvitaan jos kyseiselle tuotteelle halutaan saada CE-merkintä. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) kuvaa CE-merkinnän seuraavasti:

CE-merkintä on valmistajan ilmoitus siitä, että tuote täyttää sitä koskevat Euroopan unionin vaatimukset.

CE-merkinnällä tuotteen valmistaja tai valtuutettu edustaja ilmoittaa viranomaisille, että tuote täyttää direktiivien oleelliset turvallisuusvaatimukset. CE-merkintä voidaan yleensä kiinnittää tuotteeseen ilman puolueettoman osapuolen suorittamaa testausta.

Merkinnän saa kiinnittää vain niihin tuoteryhmiin, joissa sitä edellytetään. Jos CE-merkintää käytetään väärin, voi tuoteryhmää valvova viranomainen puuttua asiaan. Kuluttajaturvallisuuslaki (920/2011) mahdollistaa sellaisen kulutustavaran markkinoilta poistamisen, jossa ei ole lain edellyttämää CE-merkintää tai merkintä on vaatimusten vastainen. Viime kädessä CE-merkinnän väärinkäytöstä voidaan myös erikseen tuomita sakkoon (lain CE-merkintärikkomuksesta 187/2010) nojalla.

CE-merkintä on tarkoitettu helpottamaan tavaroiden vapaata liikkumista Euroopan sisämarkkinoilla. Niin sanotun uuden menettelytavan mukaisissa direktiiveissä ei anneta yksityiskohtaisia tuotevaatimuksia, vaan ainoastaan oleelliset turvallisuusvaatimukset. CE-merkintä ei ole laatumerkki. [Tukes. 2013]

CE-merkintää varten tarvitaan harmonisoidun tuotestandardin lisäksi myös testausstandardi.

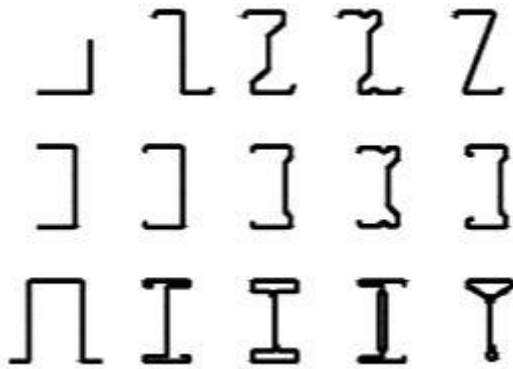
Standardin selvittämisen tuloksena valittiin testaus standardi, joka on *Eurocode 3 EN 1993-1-3 Teräsrakenteiden suunnittelu – Yleiset säännöt – Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille*. Kyseinen standardi valittiin, koska se sisältää ohjeistusta ja käytäntöjä kylmämuovattujen sauvojen testaukseen.

2.2 Eurocode 3 EN 1993-1-3

Eurooppalainen standardi Eurocode 3 EN 1993-1-3 + AC Teräsrakenteiden suunnittelu – Yleiset säännöt – Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille, on Euroopan standardikomitean teknisen komitean CEN/TC 250 valmisteleva standardi. Se sisältää sääntöjä ja käytäntöjä kylmämuovattujen sauvojen, levyjen ja kasettien suunnitteluun. Standardista selviää muun muassa seuraavat tiedot: standardin soveltamisala, viittaukset muihin standardeihin, jotka standardi velvoittaa ilmoittamaan, tietoa standardissa käytettävistä materiaaleista sekä niiden vaatimuksista, tiedot ja käytännöt rakenneana-

lyysiä varten, tietoa erilaisista murtorajatiloista, jotka syntyvät erilaisista kuormituksista, käytäntöjä erilaisten liitosten suunnitteluun, vaatimuksia ja käytäntöjä sauvojen, levyjen ja kasettien kokeelliseen mitoittamiseen, orsia, kasetteja ja levyjä koskevat erityisasiat sekä lopuksi liitetiedoissa erilaisia koemenetelmiä sauvojen, levyjen ja kasettien testaamiseen.

Standardissa käytetään termiä kylmämuovattu sauva kun kuvataan profiileja, joiden poikkileikkaus on avoin. Näihin profiileihin kuuluu myös tässä insinööriyössä käsiteltävä hattulista. Sauvoilla on toleranssien puitteissa vakiopaksuus niiden koko pituudella ja niiden poikkileikkaus pituuden suhteen voi olla vakio tai viisteellinen. Kylmämuovattu sauva koostuu useista taso-osista, joita yhdistää kaareva osa. Kuvassa 6 on esitettyä tyypillisiä kylmämuovattujen sauvojen poikkileikkauksia.



Kuva 6 Kylmämuovattujen sauvojen poikkileikkauksia

Standardin liitteissä on ohjeistukset kylmämuovattujen sauvojen testaamiseen, mikä on suurin syy, miksi kyseinen standardi valittiin testausstandardiksi. Standardi totetaa mm. seuraavaa testausmenetelmästä:

- (1) Jokaisen koekappaleen tulee olla kaikissa suhteissa samanlainen edustamansa rakenneosan tai rakenteen kanssa.
- (2) Kokeissa käytettävien tukijärjestelyjen tulee ensisijaisesti vastata pään reunaehtoja, jotka vastaavat hyvin todellisen rakenteen kiinnityksille asetettuja reunaehtoja. Jos tämä ei ole mahdollista, valitaan epäsuotuisemmat reunaehdot, jotka pienentävät murtokuormaa tai lisäävät joustavuutta (tapauksesta riippuen).

- (3) *Kuormitusjärjestelyjen tulee edustaa tapaa, jolla kuormat vaikuttavat todelliseen rakenteeseen. Tulee varmistautua, että kuormitusjärjestelyt eivät vastusta poikkileikkauksen poikittaisia muodonmuutoksia enempää kuin tapahtuisi rakenteen käyttöä vastaavilla ylikuormilla. Tulee myös varmistua, että kuormat eivät keskity linjoille, joilla on suurin kestävyys.*
- (4) *Jos annettu kuormitusyhdistelmä sisältää voimia useammasta kuin yhdestä vaikutussuunnasta, koekuorman jokaista porrasta kasvatetaan suhteessa jokaiseen näistä voimista.*
- (5) *Jokaisessa kuormitusportaassa mitataan rakenteen siirtymät tai venymät yhdessä tai useammassa edustavassa pisteessä. Siirtymiä tai venymiä ei saa lukea ennenkuin rakenne stabiloituu täysin kuorman lisäyksen jälkeen.*
- (6) *Koekappale katsotaan murtuneeksi, jos jokin seuraava ehto toteutuu: – sortuminen tai murtuminen; – jos särö alkaa levitä koekappaleen olleellisessa osassa; – jos siirtymä kasvaa kohtuuttomaksi. [EN 1993-1-3].*

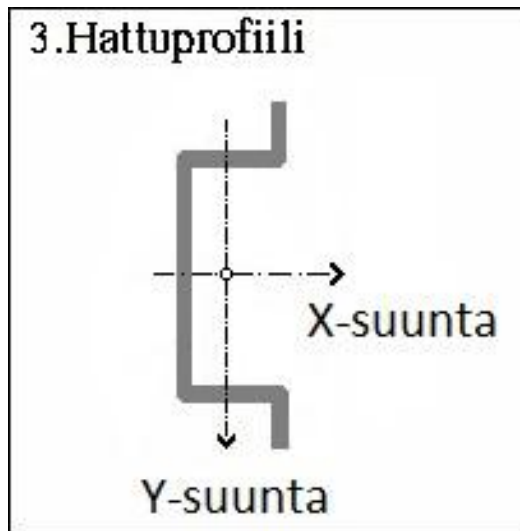
3 Testausmenetelmät

3.1 Mekaaninen testaus

Hattulistoille suoritetaan testejä kahdella eri menetelmällä. Ensimmäinen menetelmä on mekaaninen testaus, jossa hattulistaa kuormitetaan samalla tavalla kuin käyttökohdeessa. Testissä jäljitellään hattulistaa kipsilevyjärjestelmässä. Hattulistan testaus suoritetaan yksiaukkoisella taivutuskokeella. Kuormitusta kasvatetaan tasaisesti, kunnes hattulistassa tapahtuu lommahdusilmiö. Tulokset kirjataan ylös mittauspöytäkirjaan. Mekaanisessa testauksessa hattulistan testaus suoritetaan testauspenkillä, jonka suunnittelu ja valmistaminen myös kuuluivat osaksi tätä insinööritoimintaa. Vaatimukset testauspenkille olivat seuraavat. Testauspenkillä tulisi voida testata hattulistoja sekä vaaka- että pystysuuntaisessa kuormituksessa. Testauspenkin avulla tulisi myös voida

suorittaa testejä erikokoisille hattulistoille. Yhtenä vaatimuksena oli myös, että testejä voitaisiin suorittaa erilaisilla jakoväleillä.

Hattuprofiilin kuormitus suunnat on esitetty kuvassa 7. X-suuntainen kuormitus tapahtuu kuvan mukaisesti vaakasuunnassa ja y-suuntainen kuormitus puolestaan tapahtuu pystysuunnassa. Kuvan 7 x- ja y-akselit esittävät myös profiilin neutraaliakseleita.

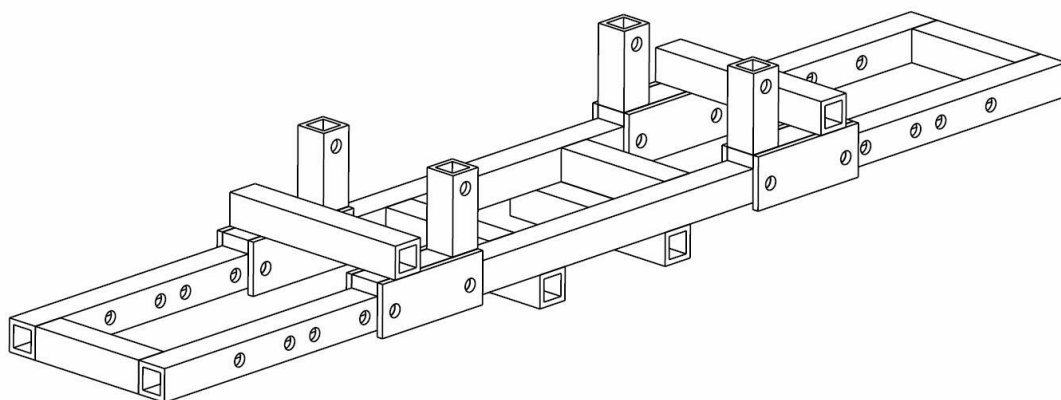


Kuva 7 Kuormitus suunnat

Hattulistojen testauspenkkiä lähdettiin suunnittelemaan toimeksiantajan antamien vaatimusten ja neuvojen pohjalta. Aluksi tutkittiin, millaisia menetelmiä on aikaisemmin käytetty teräsprofiilien testauksessa. Menetelmiä etsittiin internetistä sekä tiedusteltiin toimeksiantajalta, millaisia testejä on aikaisemmin suoritettu. Hattuprofiilin testausstandardiksi valitulla standardilla EN 1993-1-3 oli myös suuri osa suunnittelutyössä. Suunnitteluvaiheen aikana käytettiin CATIA 3D-mallinnusohjelmaa testipenkin suunnittelussa. Ohjelman avulla luotiin ensiksi 3D-mallit testipenkkiin tulevista osista ja tämän jälkeen luotiin kokoonpanomalli. 3D-malleista luotiin työpiirustukset, joiden avulla lähdettiin valmistamaan testipenkkiä.

Suunnitteluvaiheen tuloksena saatiin testauspenkille kuvan 8 mukainen malli, jonka avulla pystyttäisiin toteuttamaan yrityksen toiveet kahdesta erisuuntaisesta kuormituksesta. Testauspenkki koostuu rungosta, joka on valmistettu RHS 40x40 mm putkitangosta. Putkitangot hitsattiin yhteen rungoksi. Tämän lisäksi testauspenkkiin kuuluu kaksi kelkkaa, joihin profiili kiinnitetään ja jotka voidaan siirtää ja lukita halutulle jännäville. Kelkat koostuvat niin ikään RHS-putkitangosta sekä myös 80x10 mm latta-

raudoista, joista kelkat on kokoonpantu hitsaamalla. Kelkassa on kaksi kiinnityssuuntamahdollisuutta, joista toinen on pystysuuntaiselle ja toinen vaakasuuntaiselle hattulistan kiinnitykselle tarkoitettu. Kun kuormitussuuntaa halutaan vaihtaa, kelkka käännetään toisinpäin. Testipenkin runko-osaan on porattu reikiä, joihin kelkat kiinnitetään tapeilla. Reiät on porattu niin, että kelkat saadaan asetettua tietyin jänneväleihin. Kyseiset jännevälit ovat yrityksen toiveen mukaisesti 600 mm, 1000 mm ja 1200 mm. Kokoonpanokuva testauspenkin rungosta löytyy tämän insinöörityön liitteestä 2.

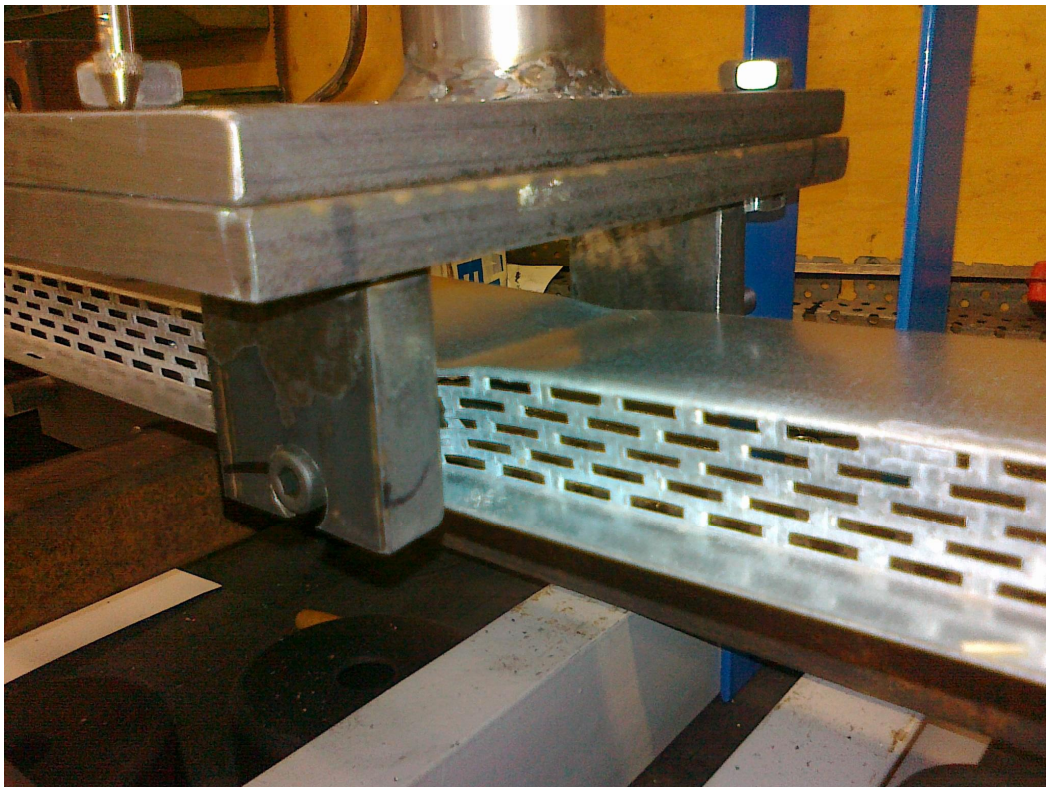


Kuva 8 Testauspenkin malli

Testauspenkin kuormituksesta vastaa HBM 4T hydraulinen puristin. Puristimeen luodaan hydraulinen paine käsipumpulla. Puristimeen on myös lisätty painemittari, jonka avulla voidaan hattulistaa kuormittaessa mitata paineet. Testissä mitatut painearvot voidaan testin jälkeen muuntaa voimiksi. Jotta tämä onnistuisi, tarvitaan tieto puristimen sylinterin männän halkaisijasta. Puristimen sylinterin männän koko ei selvinnyt laitteen mukana tulleista ohjeista, joten asiaa jouduttiin tiedustelemaan laitteen valmistajalta. Valmistaja ilmoitti sylinterin männän halkaisija olevan 32 mm:n kokoinen. Tämän tiedon avulla saadaan myöhemmin testeissä mitatut paineen arvot muunnettua voimiksi.

Jotta puristimen kuormitus saataisiin kohdistettua hattulistaan oikein, luotiin tähän tarkoitukseen sopivat työkalu. Työkalut koostuvat sorvatusta holkista, 80x10 mm:n lattaraudasta sekä kahdesta pystysuorasta 50x20 mm:n lattaraudasta. Pystysuorissa lattarauodoissa on reiät, joiden avulla hattulista saadaan kiinnitettyä työkaluun. Kokoonpano on suoritettu hitsaamalla. Kokoonpanokuva löytyy tämän opinnäytetyön liitteestä 2.

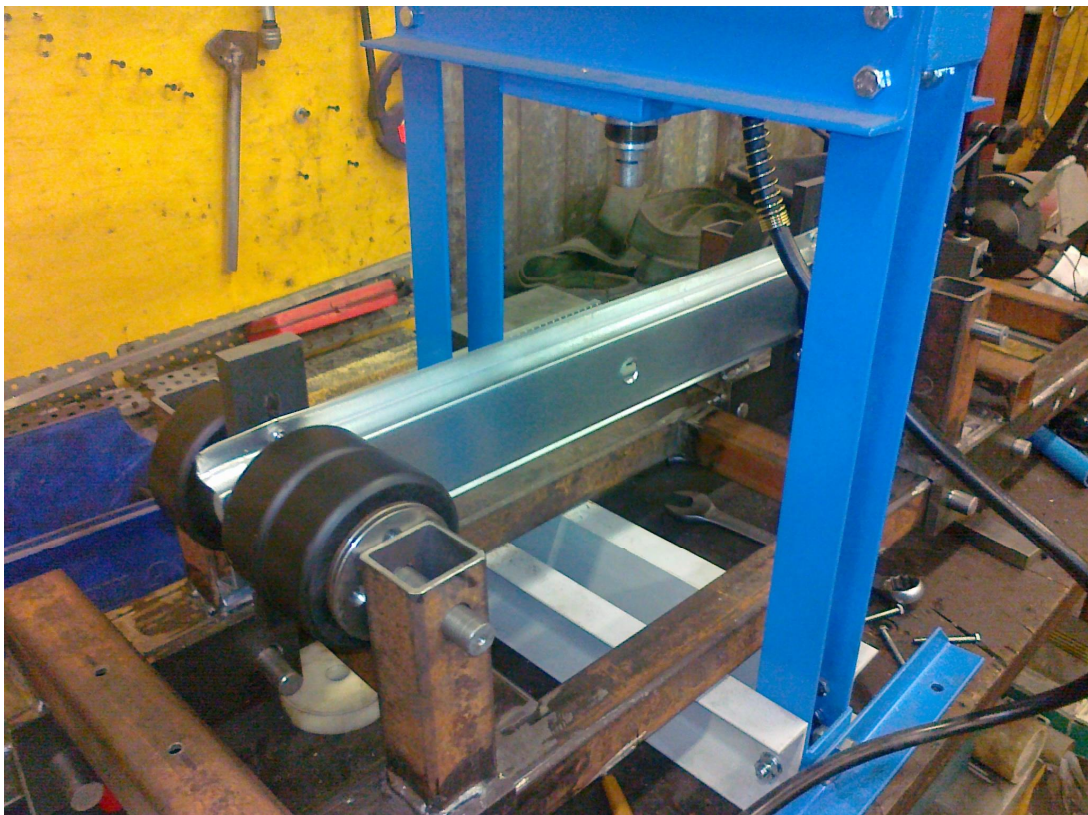
Kuvassa 9 nähdään x-suuntaiseen kuormitukseen tarkoitettu työkalu ja kuvassa 10 puolestaan nähdään y-suuntaiseen kuormitukseen tarkoitettu työkalu. Työkalu asetetaan puristimen sylinterin varren jatkoksi sorvatun holkin avulla. Pystysuorat lattaraudat sekä 80x10 mm:n lattarauta muodostavat haarukan, joka asetetaan hattulistan ympärille. Hattulista kiinnitetään työkaluun tapin avulla. Jotta tämä onnistuisi, on hattulistaan ensiksi porattava reiät tai reikä riippuen kuormitus suunnasta. Kun hattulistan lommahduskestävyyttä halutaan mitata pystysuunnassa, pitää hattulistaan porata yksi reikä kuvan 11 mukaisesti. Kun puolestaan halutaan suorittaa testi vaakasuuntaisessa kuormituksessa, pitää reikiä porata kaksi kappaletta kuvan 12 mukaisesti. Reiät tulee porata profiilin neutraaliakselien alapuolelle. Tämä johtuu siitä että lommahdus tapahtuu neutraaliakselin puristetulla puolella, eli tässä tapauksessa neutraaliakselin yläpuolella.



Kuva 9 Työkalu x-suuntaiseen kuormitukseen



Kuva 10 Työkalu y-suuntaiseen kuormitukseen



Kuva 11 HTL 25/70 y-suuntainen kiinnitys



Kuva 12 HTL 25/70 x-suuntaine kiinnitys

3.2 Tietokonesimulaatio

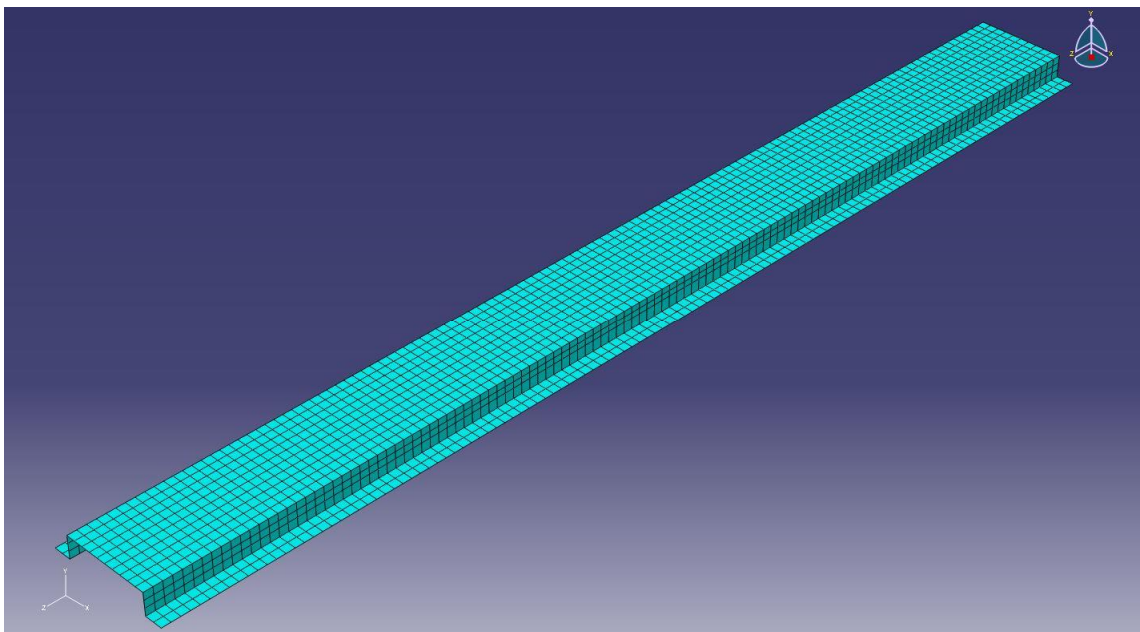
Tätä lukua kirjoitettaessa käytettiin lähteenä professori Paul M. Kurowskin kirjaa *Finite Element Analysis for Design Engineers*. Kirja on kirjoitettu englanniksi, joten kerätyt tiedot on käännetty suomeksi.

Testausmenetelmässä käytetään tietokonesimulaatiota apuvälineenä hattulistan kestävyiden selvittämiseksi sekä mekaanisen testauksen tarkastamiseksi. Tietokonesimulaatiossa käytetään Dassault Systems Abaqus FEA-ohjelmaa, joka on saatu käyttöön Tieteen tietotekniikka keskuksen (CSC, eli IT Center for Science) kautta. Ohjelman käyttää hyväkseen FEM (Finite element method) -menetelmää, ja sen avulla saadaan laskennallinen arvo hattuprofiilin kestävydestä.

FEA (Finite Element Analysis) on tietokonemallinnuksen työkalu, jota käytetään suunnittelututkimuksessa. Suunnittelututkimus on osien, kokoonpanojen ja rakenteiden ominaisuuksien tutkintaprosessi. Suunnittelututkimus voidaan kohdistaa todellisiin esineisiin tai malleihin, jotka vastaavat tiettyjä piirteitä todellisesta esineestä. Jos käytetään mallia, todellisen esineen sijaan, voidaan tutkimus suorittaa jo suunnitteluvaiheessa

ennen lopullisen tuotteen tai prototyypin valmistamista. Kyseiset mallit voivat olla fyysisiä malleja (esim. pienoismalli tai 3D-malli) tai matemaattisia malleja. Matemaattisella mallilla tarkoitetaan mallia, johon on matemaattisen laitteiston avulla kaapattu ja kuvattu osan tai rakenteen tietty käyttäytyminen. Yksinkertaisia matemaattisia malleja voidaan tutkia ja ratkaista analyttisesti, mutta monimutkaisempien mallien ratkaisemiseen tarvitaan numeeristen menetelmien käyttöä. FEA on yksi kyseisistä menetelmistä, joita voidaan käyttää monimutkaisten matemaattisten mallien ratkaisemiseen. Tästä johtuen FEA on laajalti käytetty menetelmä tieteessä ja tekniikassa. [Finite Element Analysis for Design Engineers. 2004]

FEM on numeerinen menetelmä, jota yleisesti käytetään FEA:ssa. Koko ratkaisuavaruus (mallin geometria) tulee diskretoida (silmukoida verkoksi) yksinkertaisen muotoiseksi elementeiksi. Kuvassa 13 on esitettynä elementtien muodostama elementtiverkko. Elementit liittyvät toisiinsa solmujen välityksellä. Elementtiverkon tiheys vaikuttaa tulosten tarkkuuteen, mutta myös ratkaisuaikaan.



Kuva 13 Elementtiverkko

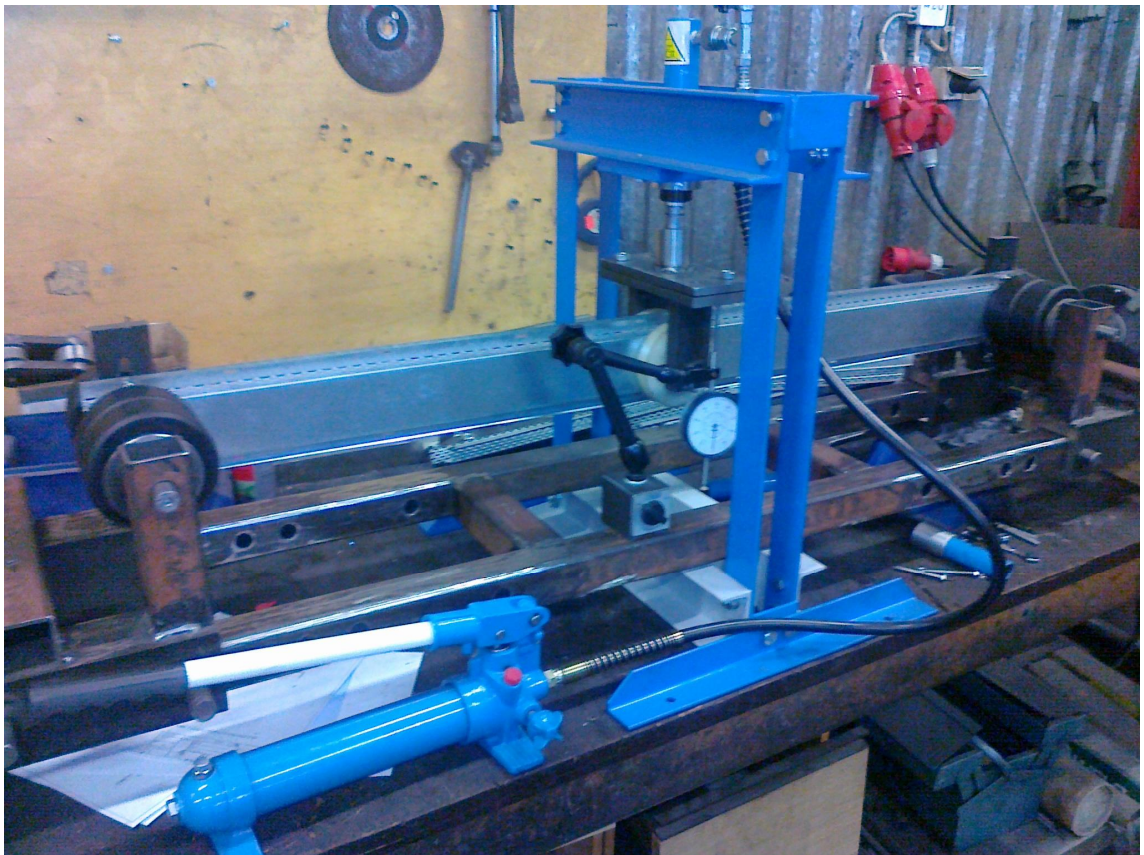
FEA:sta on tullut ratkaisutyökalu tuntemattomasta kuormituksesta johtuvan vaurioitumisen ennakoimiseksi. Analyysi esittää materiaalin ongelma-alueet ja antaa näin suunnittelijoille mahdollisuuden nähdä kaikki teoreettiset kuormitusmuodot materiaalin sisäpuolelta. FEA:lla voidaan suorittaa mm. seuraavia analyysityyppejä: terminen analyysi, epälineaarinen analyysi, staattinen analyysi, moodianalyysi, lommahdusanalyysi ja

dynaaminen analyysi. Tässä työssä käytetään lommahdusanalyysiä. Tämän tuotesuunnittelun ja testauksen menetelmä on huomattavasti kustannustehokkaampi kuin valmistuskustannukset olisivat, jos jokainen näyte valmistettaisiin ja testattaisiin erikseen. [Finite Element Analysis for Design Engineers. 2004]

4 Testaus

4.1 Mekaaninen testaus

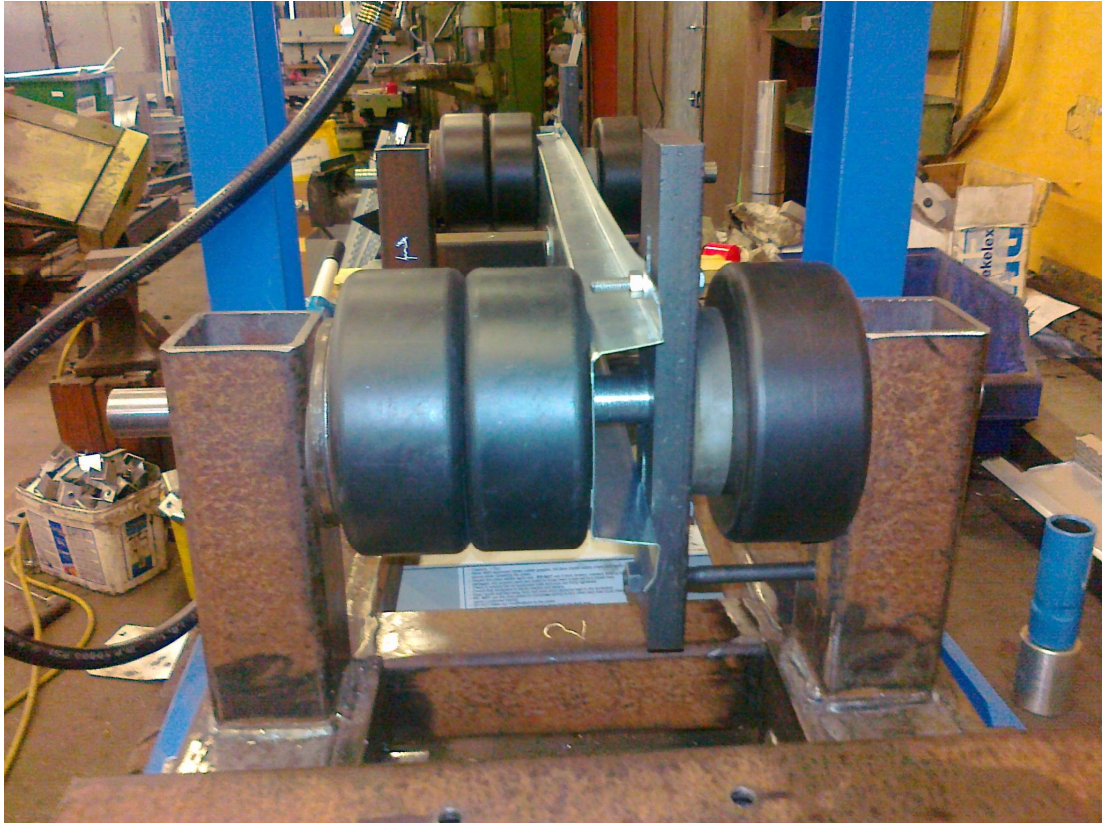
Lommahdusanalyysin mekaanista testausosaa varten suoritettiin testit HTL 25/70 -hattuprofiilille ja XHTML 25/70 Xelent -hatturuoteelle. Molempien profiilien ainevahvuudeksi valittiin 0,7 mm ja ne valmistettiin samasta lähtökelasta. Syy tähän on halu selvittää profiilin poikkileikkauksen vaikutus profiilin lommahdusherkkyyteen sekä poistaa mahdolliset materiaalista johtuvat erot. Testit suoritettiin kuvan 14 mukaisella testauspenkillä.



Kuva 14 Testauspenkki

Testaukset aloitettiin valmistamalla koekappaleita. Koekappaleita valmistettiin 6 kpl jokaista jänneväliä varten. Tämä tarkoittaa että jokaista jänneväliä ja kuormitus-suuntaa kohden tehdään kolme mittausta. Koekappaleisiin tehtiin valmiiksi reiät, joiden avulla kappaleet kiinnitettiin testauspenkkiin. Reikiä tehdessä otettiin huomioon niiden mahdolliset vaikutukset mittaustuloksiin. Tämä tosin heikentää rakennetta vain vähän todelliseen tilanteeseen verrattuna, joten kokeista saadut mittaustulokset eivät anna todellista tilannetta kestävämpiä tuloksia. Koekappaleiden valmistelun jälkeen siirryttiin itse testaukseen.

Aluksi testipenkin kelkat siirrettiin oikealle jännevälille sekä käännettiin oikeinpäin. Kappaleet kiinnitettiin, testattavasta kuormitus-suunnasta riippuen, joko pysty- tai vaakasuuntaan testipenkin kelkkoihin. Profiilin päiden kiinnitystapa tarkoittaa, että reunaehtona on jäykkä tuenta. Kuvassa 15 on esitettyä pystysuuntainen kiinnitys ja kuvassa 16 puolestaan on vaakasuuntainen kiinnitys. Pystyasentoon kiinnitettäessä hattuprofiilia tuetaan muovikiekoilla sivusuunnassa, jotta siihen kohdistuvaa vääntöä ei pääse tapahtumaan. Profiili on myös todellisessa tilanteessa estynyt vääntymästä, koska se on kahden levyn välissä. Testauspenkkiin kiinnityksen jälkeen kiinnitettiin koekappale hydraulipuristimen työkaluun tapilla. Seuraavaksi asetettiin taipumaa mittaava mittakello jalustan avulla paikoilleen. Tämän jälkeen avattiin vielä painemittarin sulkuhana, minkä jälkeen mittaukset voitiin aloittaa.



Kuva 15 Pystysuuntainen kiinnitys



Kuva 16 Vaakasuuntainen kiinnitys

Kuormitusta kasvatettiin hydraipuristimen käsipumpulla tasaisesti ja mittakellosta luettiin taipuma jokaisen mittausvälin kohdalta. Mittausväli on 1 bar, kun käytetään 0–20 barin mittaria, 2 bar, kun käytetään 0–60 barin mittaria ja 5 bar, kun käytetään 0–100 barin mittaria. Paineen määrä ja taipumat kirjattiin ylös taulukkoon myöhempää analysointia varten. Jokaisen mittauksen kohdalla suoritettiin myös profiilin visuaalinen tarkastus lommahduksen varalta. Kuormitusta kasvatettiin aina lommahdukseen saakka. Kun profiili on saatu lommahtamaan, irrotettiin se testauspenkistä ja otettiin uusi koekappale testaukseen.

4.2 Simulaatio

Tietokonesimulaatio suoritettiin Dassault Systemes Abaqus 6.9 -versiolla, joka saatiin käyttöön CSC:n kautta, ja sen CAE-moduulissa [Dassault Systems. 2014]. Opinnäytetyön liitteestä 3 löytyy yksityiskohtainen ohjeistus hattuprofiilisimulaation toteuttamisesta. Ohjeistuksessa käy ilmi, mitä ohjelman työkalua ja mitä arvoja käytettiin.

Simulaatio aloitettiin mallintamalla hattuprofiilin poikkileikkaus. Tämän jälkeen annettiin profiilin poikkileikkaukselle pituus, jonka mukaan ohjelma pursottaa profiilin. Kummallekin kuormitus suunnalle on tehtävä kolme erilaista simulaatiota, koska ne on suoritettava kolmelle eri jänneväliä. Kyseiset jännevälit ovat 600, 1000 ja 1200 mm. Tästä seuraa, että on tehtävä yhteensä kuusi erilaista simulaatiota yhdelle profiilille. Seuraava vaihe oli määrittää ohjelmalle profiilin materiaalivektorit ja levyn paksuus sekä määrittää analysoitava kappale.

Kun kappaleen ominaisuudet oli määritetty, siirryttiin lommahdusanalyysivaiheen rakentamiseen. Luotiin siis analyysivaihe, jonka avulla lommahdusanalyysi suoritetaan. Tämän jälkeen luotiin reunaehdot analyysiä varten. Profiili kiinnitettiin neljästä reunasta ja sekä siirtyminen että kiertäminen estettiin kaikkiin suuntiin. Kun reunaehdot oli syötetty, luotiin seuraavaksi profiilin keskelle ulkoinen voima. Voiman tyypiksi valittiin pistevoima ja sen arvoksi annettiin 2000 N. Tämä koskee y-suuntaista kuormitussuuntaa. X-suuntaisessa kuormituksessa luotiin kaksi pistevoimaa joiden arvoksi annettiin 1000 N. Tämä johtuu siitä että voidaan käyttää samaa 2000 N:n arvoa myöhemmin mittaus-
tolosten arvioinnissa.

5 Mittaustulokset

5.1 Testauksen tulokset

Mekaanisen testauksen tulokset ilmoitetaan keskiarvona kolmesta kokeesta. Täydelliset mittauspöytäkirjat löytyvät tämän opinnäytetyön liitteestä 4. Paine arvot on muunnettu voimiksi käyttämällä seuraavaa kaavaa

$$p = \frac{F}{A}, \text{ [Tekniikan kaavasto, 99, kaava 1.]}$$

missä p on hydraulipuristimen tuottama paine, F on sylinterin aiheuttama voima ja A on sylinterin männän poikkipinta-ala. Kaavaan lisätään vielä hyötysuhde η , jonka arvona käytetään 0,9, koska sylinterissä saattaa esiintyä painehäviöitä. Kaava saa siis seuraavan muodon

$$p = \frac{F}{\eta * A}$$

Kaavaa muunnetaan jotta saadaan laskettua voima F

$$F = \eta * p * A.$$

Sylinterin poikkipinta-ala saadaan laskettua valmistajan tietojen avulla. Valmistaja ilmoitti sylinterin halkaisijan olevan $d = 0,032 \text{ m} \rightarrow r = \frac{d}{2} = \frac{0,032 \text{ m}}{2} = 0,016 \text{ m}$

$$A = \pi * r^2.$$

Lopullinen kaava on siis seuraavanlainen

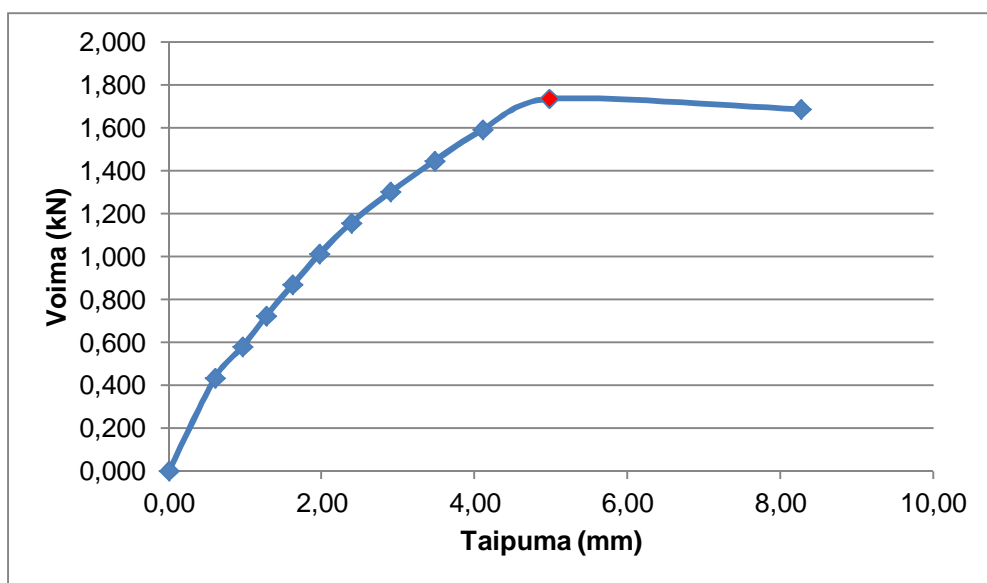
$$F = \eta * p * \pi * r^2.$$

Kaavan avulla muunnetaan saadut painearvot voimiksi.

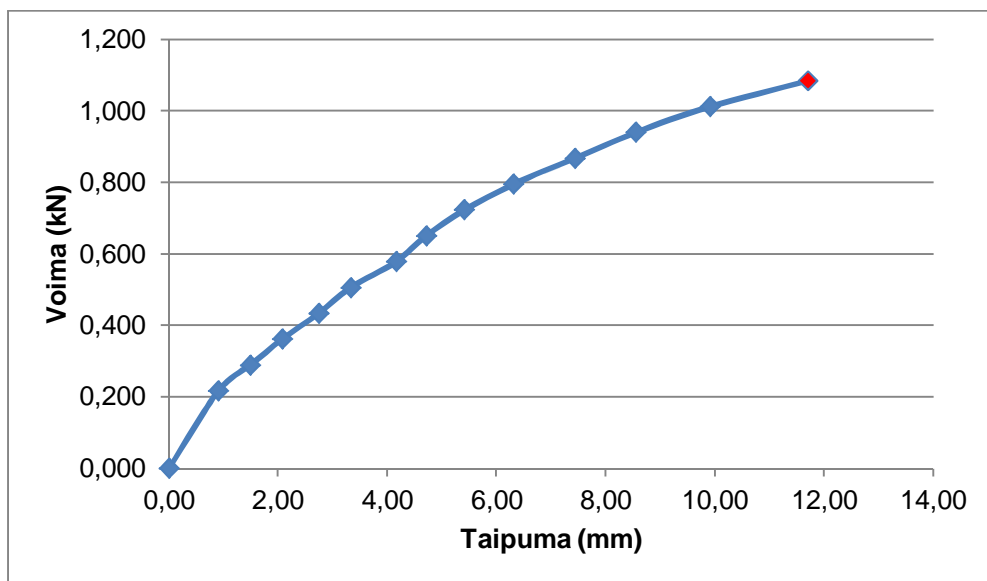
Hattuprofiilien lommahdusvoima F_{kr} saadaan, kun testissä havaitaan silmämääräisesti, että profiili on lommahtanut.

5.1.1 HTL 25/70 -hattuprofiili

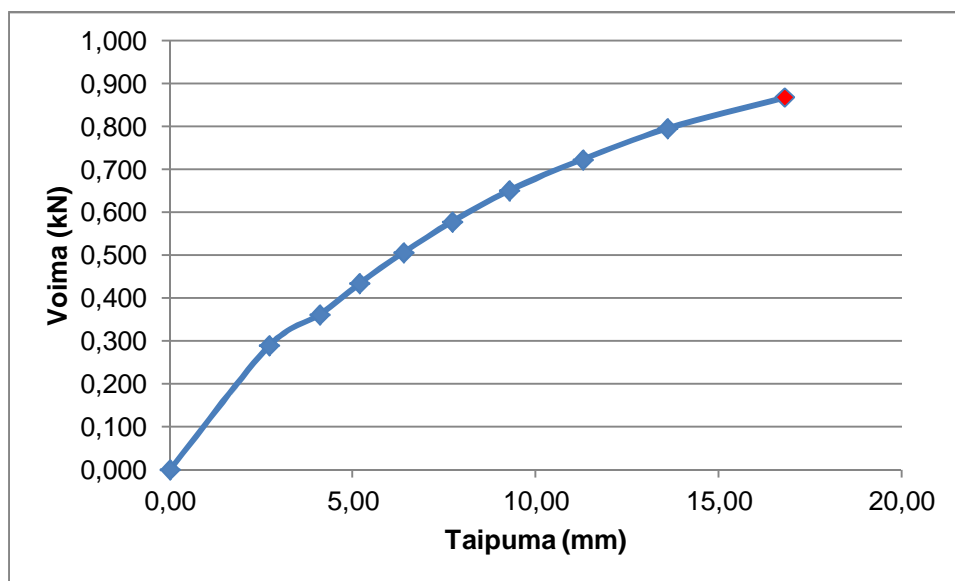
Kuvissa 17, 18 ja 19 on esitetty HTL 25/70 -hattuprofiilin x-suuntaisen testauksen mittaustulokset. Kuvaajien x-akselilla on hattuprofiilin taipuma millimetreissä ja y-akselilla on puolestaan profiiliin kohdistettu voima kilonewtoneissa. Lommahdusvoima F_{kr} on kuvaajissa esitetty punaisena pisteenä. Tämä piste tarkoittaa hetkeä, jona lommahdus on kokeissa syntynyt. Kuvaajien tulisi olla lineaarisia aina lommahdukseen saakka.



Kuva 17 X-suuntainen voima/taipuma (600 mm)

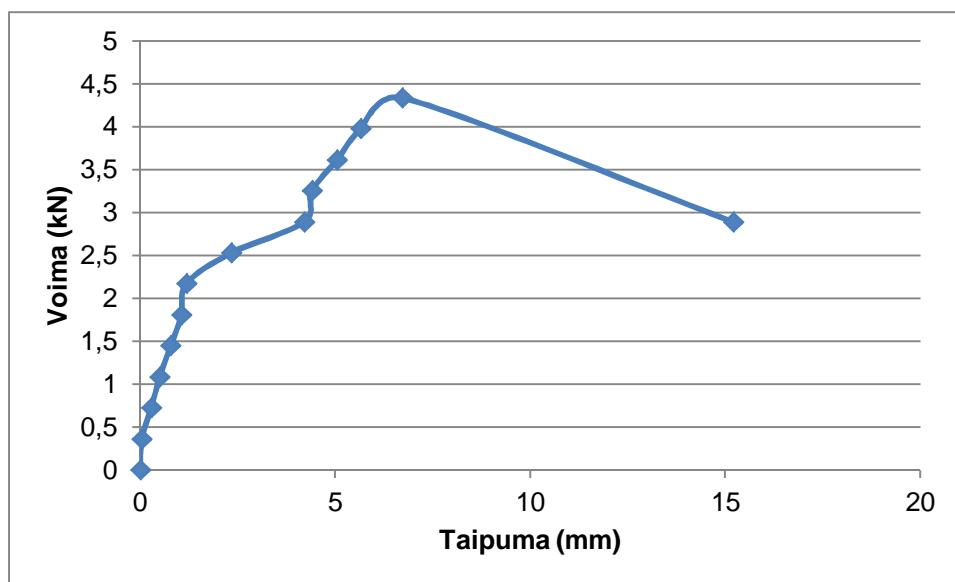


Kuva 18 X-suuntainen voima/taipuma (1000 mm)

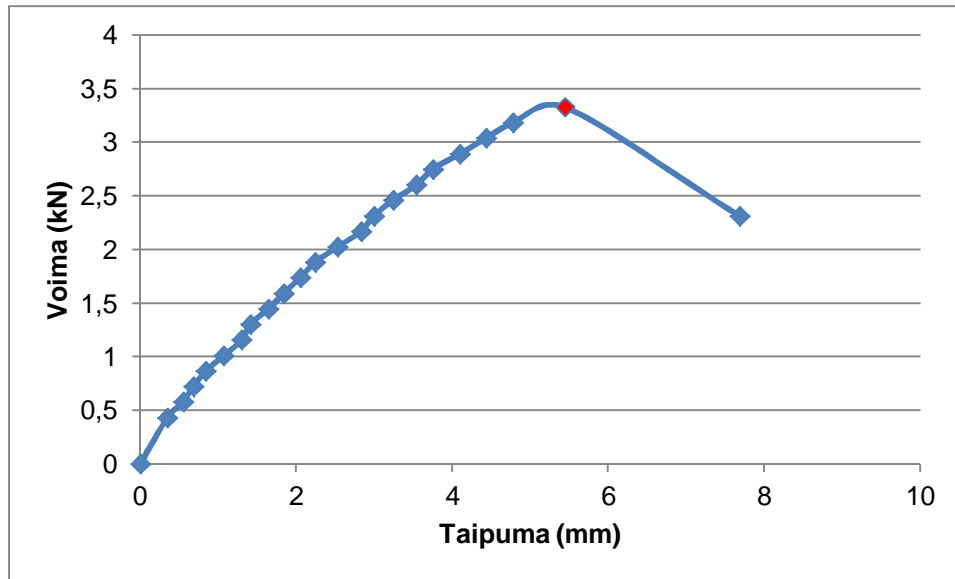


Kuva 19 X-suuntainen voima/taipuma (1200 mm)

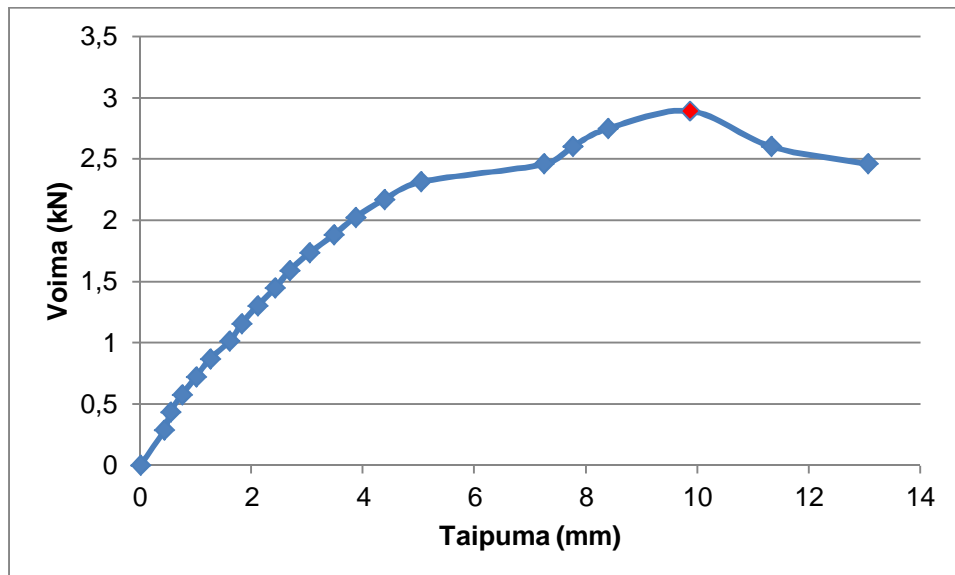
Kuvissa 20, 21 ja 22 on puolestaan esitettynä kyseisen hattuprofiilin y-suuntaisen testauksen mittaustulokset. Kuvaajien x-akselilla on hattuprofiilin taipuma millimetreissä ja y-akselilla on puolestaan profiiliin kohdistettu voima kilonewtoneissa. Lommahdusvoima F_{kr} on kuvaajissa esitetty punaisena pisteinä.



Kuva 20 Y-suuntainen voima/taipuma (600 mm)



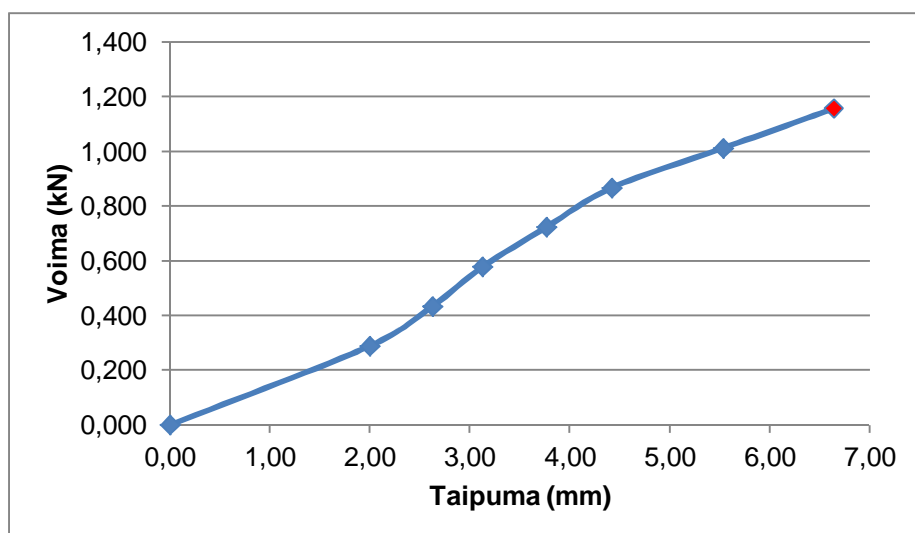
Kuva 21 Y-suuntainen voima/taipuma (1000 mm)



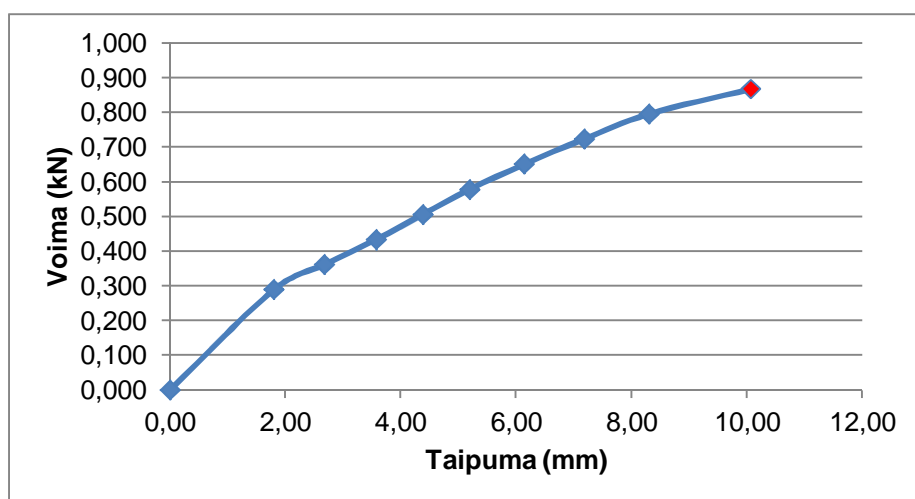
Kuva 22 Y-suuntainen voima/taipuma (1200 mm)

5.1.2 XHTL 25/70 Xelent -hattuprofiiliruode

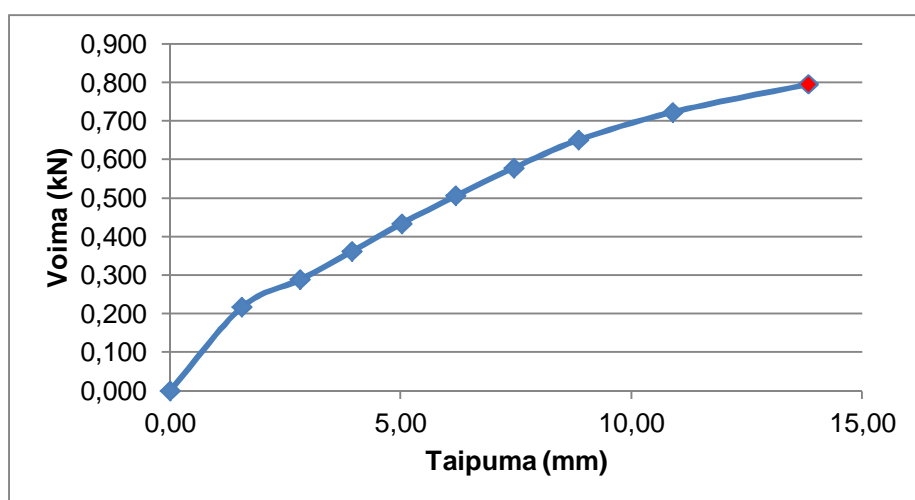
Kuvissa 23, 24 ja 25 on esitettyä XHTL 25/70 -hattuprofiiliruoteen x-suuntaisen testausten mittaustulokset. Kuvaajien x-akselilla on hattuprofiiliruoteen taipuma millimetreissä ja y-akselilla on puolestaan ruoteeseen kohdistettu voima kilonewtoneissa. Lommahdusvoima F_{kr} on kuvaajissa esitetty punaisena pisteinä. Tämä piste tarkoittaa hetkeä jona lommahdus on kokeissa syntynyt. Kuvaajien tulisi olla lineaarisia aina lommahdukseen saakka.



Kuva 23 X-suuntainen voima/taipuma (600 mm)

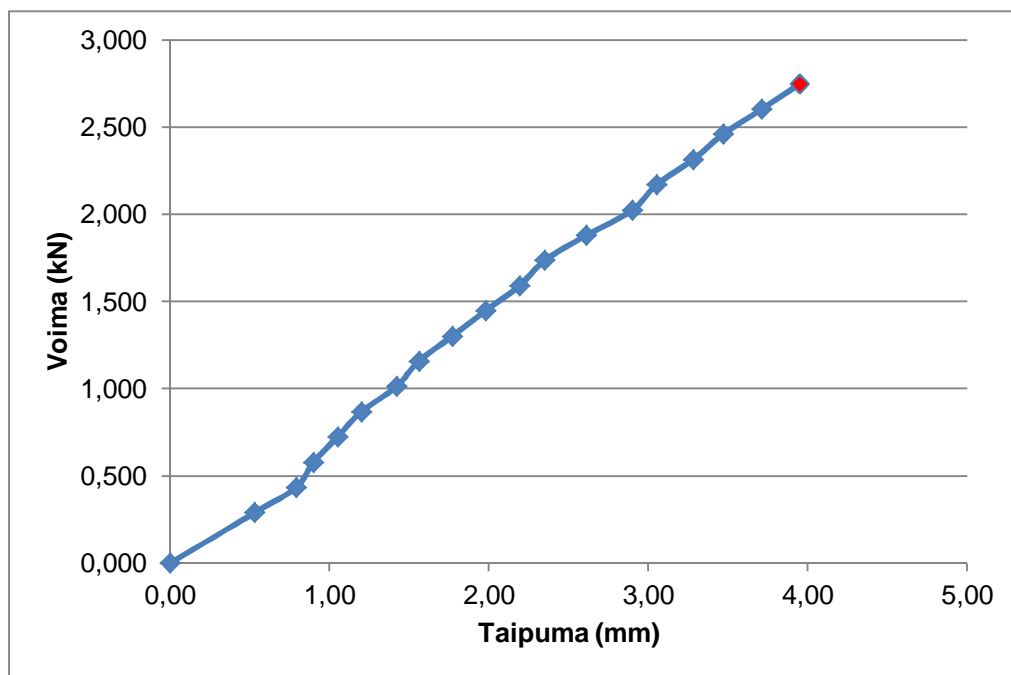


Kuva 24 X-suuntainen voima/taipuma (1000 mm)

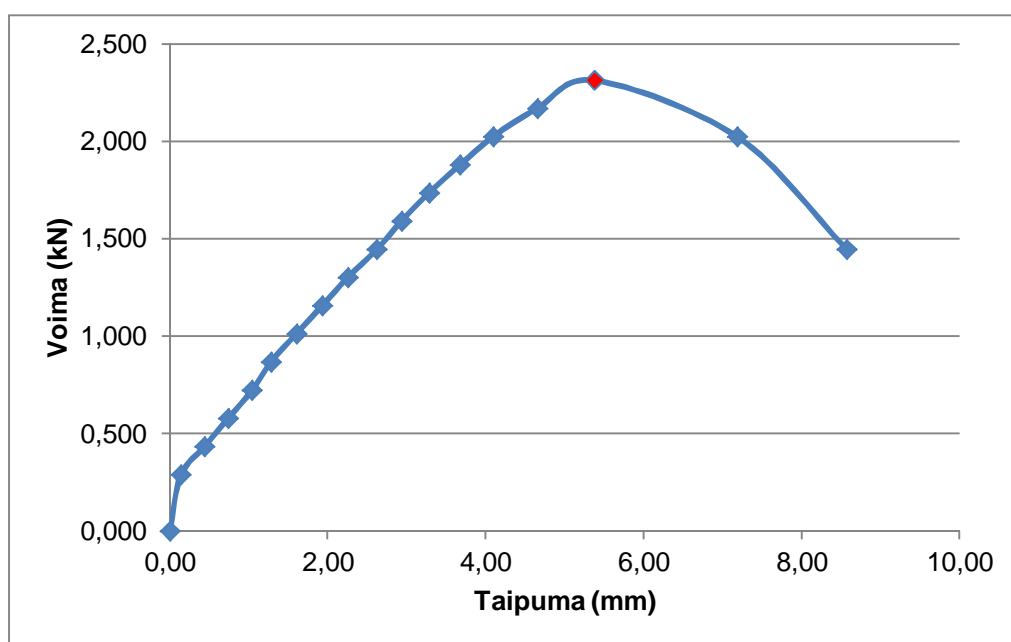


Kuva 25 X-suuntainen voima/taipuma (1200 mm)

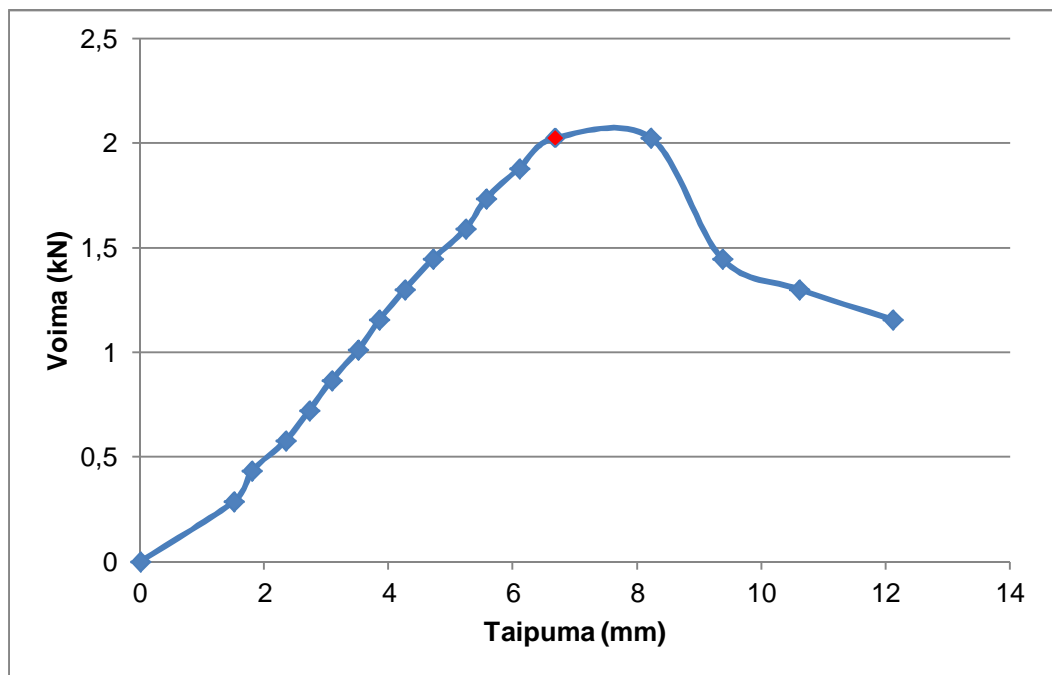
Kuvissa 26, 27 ja 28 on puolestaan esitettyä kyseisen hattuprofiiliruoteen y-suuntaisen testauksen mittaustulokset. Kuvaajien x-akselilla on hattuprofiiliruoteen taipuma millimetreissä ja y-akselilla on puolestaan ruoteeseen kohdistettu voima kilonewtoneissa. Lommahdusvoima F_{kr} on kuvaajissa esitetty punaisena pisteenä.



Kuva 26 Y-suuntainen voima/taipuma (600 mm)



Kuva 27 Y-suuntainen voima/taipuma (1000 mm)



Kuva 28 Y-suuntainen voima/taipuma (1200 mm)

5.2 Simulaation tulokset

Tietokonesimulaatiosta saadaan Eigen Value -arvo, joka kerrotaan käytetyllä voimalla (tässä tapauksessa 2 kN). Tietokonesimulaatio antaa taulukoiden 1 ja 2 mukaiset lommahdusvoimat HTL 25/70 -hattuprofiilille ja XHTML 25/70 -hattuprofiiliruoteelle.

Taulukko 1 HTL 25/70 tulokset

Kuormitusasuunta	Jänneväli	Eigen Value	Lommahdusvoima, F_{kr}
X	600 mm	0,60957	1,21914 kN
	1000 mm	0,35303	0,70606 kN
	1200 mm	0,29159	0,58318 kN
Y	600 mm	3,7233	7,4466 kN
	1000 mm	1,9705	3,941 kN
	1200 mm	1,5083	3,0166 kN

Taulukko 2 XHTML 25/70 tulokset

Kuormitusasuunta	Jänneväli	Eigen Value	Lommahdusvoima, F_{kr}
X	600 mm	0,26257	0,52514 kN
	1000 mm	0,14948	0,29896 kN
	1200 mm	0,12326	0,24652 kN
Y	600 mm	2,8562	5,7124 kN
	1000 mm	1,6912	3,3824 kN
	1200 mm	1,3036	2,6072 kN

6 Tulosten arviointi ja vertailu

6.1 HTL 25/70 -hattuprofiilin mittaustulosten arvio ja vertailu

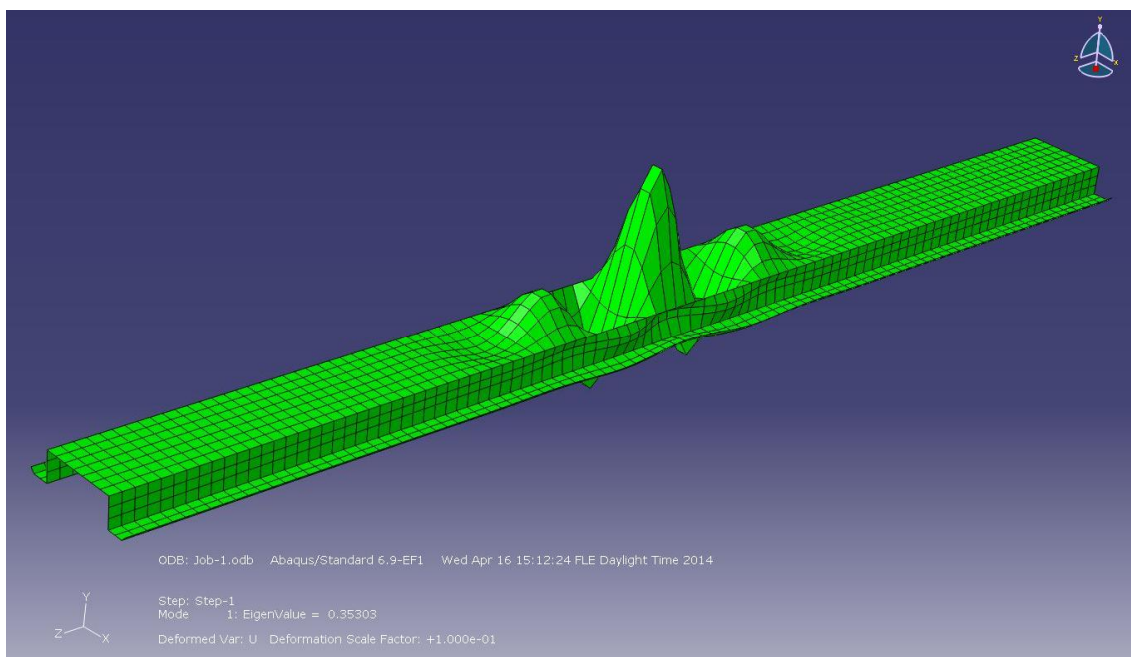
HTL 25/70 -hattulistalle saatiin mekaanisessa testauksessa x-suuntaisesti kuvien 17, 18 ja 19 mukaiset mittaustulokset ja puolestaan y-suuntaisesti saatiin kuvien 20, 21 ja 22 mukaiset mittaustulokset. Simulaatio antoi kyseiselle hattulistalle puolestaan taulukon 1 mukaiset lommahdusvoimat.

Mekaanisen testauksen mittaustuloksissa on huomioitava y-suuntaisessa testauksessa 600 mm:n jännevälillä epäonnistunut tulos. Tämä johtuu siitä, että testauksen aikana profiilissa syntyi leikkausta ennen kuin lommahdusilmiö pääsi syntymään. Tämä tarkoittaa, että materiaalin leikkautuminen tapahtuu paljon ennen mahdollista lommahtamista. Tämän takia verrataan ainoastaan 1000 mm:n jännevälillä tehtyjä mittauksia sekä x-että y-kuormitussuunnissa.

Tarkastellaan silmämääräisesti aluksi mekaanisesta ja tietokonesimulaatiosta saatuja tuloksia, x-suuntaisessa kuormituksessa 1000 mm:n jakovälillä, kuvissa 29 ja 30.



Kuva 29 X-suuntaisen 1000 mm:n jakovälillä suoritettun testin tulos



Kuva 30 Abaqus-ohjelmalla suoritettu testi (X-suuntainen ja 1000 mm:n jakovälillä).

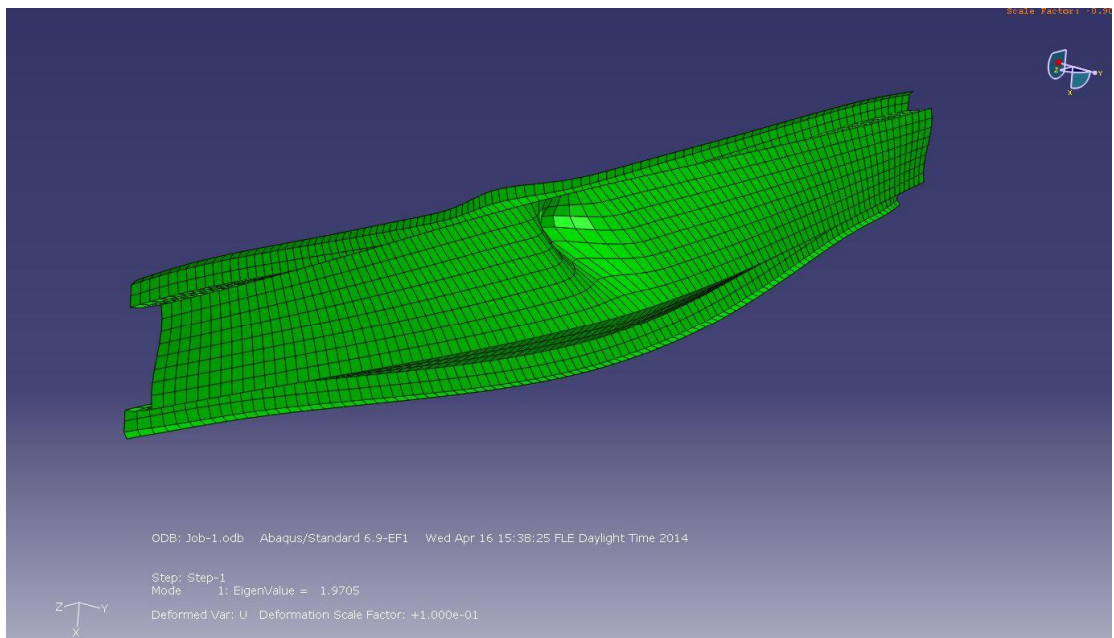
Kuvia tarkastellessa huomataan samanlaisia piirteitä lommahdusilmiön esiintymisessä. Tässä on tosin huomioitava että Abaqus-ohjelma piirtämät siirtymät ovat liioiteltuja. Silmämääräisen tarkastelun jälkeen voidaan todeta lommahdustavan olevan sama molemmissa tapauksissa.

Seuraavaksi analysoidaan saatuja mittaustuloksia kuvasta 18 ja taulukosta 1. Havaitaan, että Abaqus-ohjelmalla saadaan jonkin verran pienempi tulos kuin mekaanisella testauksella on saatu. Tämä voi johtua siitä, että oikeassa tilanteessa materiaalin aineenvahvuus saattaa olla jonkin verran suurempi kuin ilmoitettu tai materiaalin ominaisuudet ovat erilaiset kuin on tiedoissa ilmoitettu. Myös valmistusmenetelmä saattaa vaikuttaa tulosten eroavaisuuteen.

Seuraavaksi tarkastellaan hattuprofiilia y-suuntaisessa kuormituksessa. Tarkastellaan silmämääräisesti aluksi mekaanisesta ja tietokonesimulaatiosta saatuja tuloksia, y-suuntaisessa kuormituksessa 1000 mm:n jakovälillä, kuvissa 31 ja 32.



Kuva 31 HTL 25/70 -hattuprofiili y-suuntaisessa kuormituksessa ja 1000 mm:n jakovälillä



Kuva 32 Abaqus-ohjelmalla suoritettu simulaatio (y-suunta ja 1000 mm:n jakovälillä)

Kuvia tarkastellessa huomataan samanlaisia piirteitä lommahdusilmiön esiintymisessä. Tässä on tosin huomioitava, että Abaqus-ohjelman piirtämät siirtymät ovat liioiteltuja.

Silmämääräisen tarkastelun perusteella voidaan todeta lommahdustavan olevan sama molemmissa tapauksissa.

Seuraavaksi analysoidaan saatuja mittaustuloksia kuvasta 21 ja taulukosta 1. Havaitaan, että Abaqus-ohjelmalla saadaan jonkin verran suurempi tulos kuin mekaanisella testauksella on saatu. Tämä voi johtua mm. siitä, että valmistusmenetelmä saattaa vaikuttaa tulosten eroavaisuuteen. Rullamuovatussa profiilissa saattaa olla venymiä, mikä on saattanut aiheutua rullamuovausprosessissa tai rei'itettäessä peltiä. Myös profiilin poikkipinta-ala saattaa olla todellisessa tilanteessa erilainen kuin simuloidussa. Profiilin kulmat voivat esim. olla pyöreämpiä, mikä saattaa heikentää rakennetta jonkin verran.

Voidaan todeta, että HTL 25/70 -hattuprofiilin testit ja simulaatiot vastaavat toisiaan tarpeeksi tarkasti. Syitä eroavaisuuksiin voivat olla mm. reunaehdot testin ja Abaqus-ohjelman välillä tai se, että liikutaan lähellä materiaalin myötörajaa.

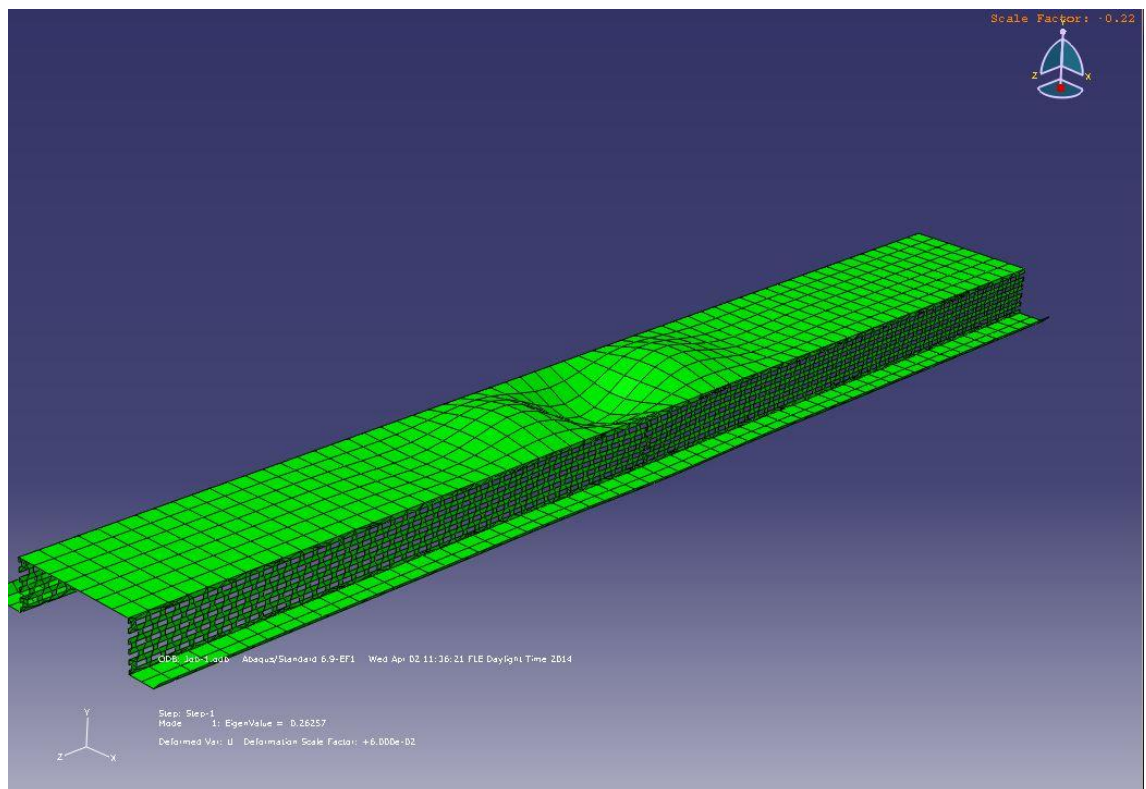
6.2 XHTML 25/70 Xelent -hattuprofiiliruoteen mittaustulosten arviointi ja vertailu

XHTML 25/70 -hattuprofiiliruoteelle saatiin mekaanisessa testauksessa x-suuntaisesti kuvien 23, 24 ja 25 mukaiset mittaustulokset ja puolestaan y-suuntaisesti saatiin kuvien 26, 27 ja 28 mukaiset mittaustulokset. Simulaatio antoi kyseiselle hattulistaruoteelle puolestaan taulukon 2 mukaiset lommahdusvoimat.

Tarkastellaan tuloksia 600 mm:n jännevälillä sekä x- että y-kuormitussuunnissa. Aluksi suoritetaan silmämääräinen tarkastelu tuloksista, jotta voidaan todeta lommahdusilmiöiden olevan samat. Tulokset on esitetty kuvissa 33 ja 34.



Kuva 33 XHTL 25/70 -hattuprofiiliruoteen x-suuntainen testi 600 mm:n jakovälillä

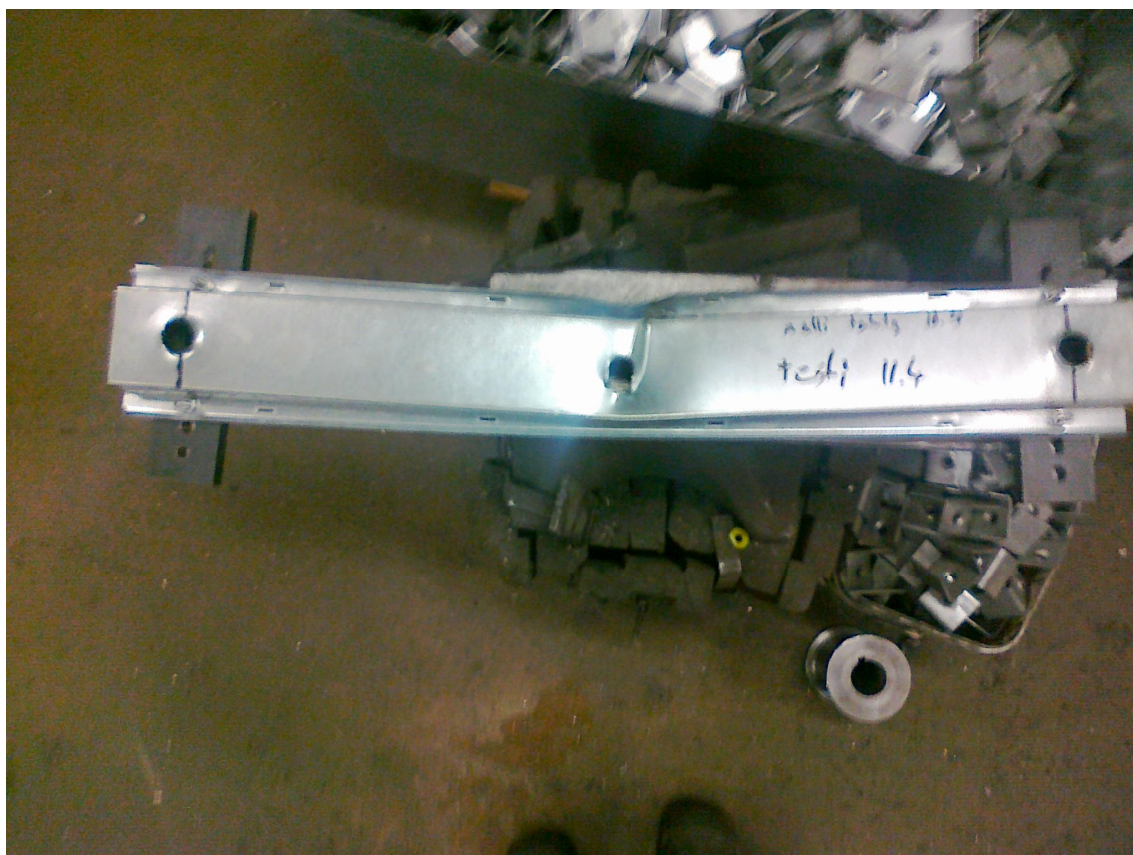


Kuva 34 Abaqus-ohjelmalla suoritettu testi (x-suuntainen ja 600 mm:n jakovälillä)

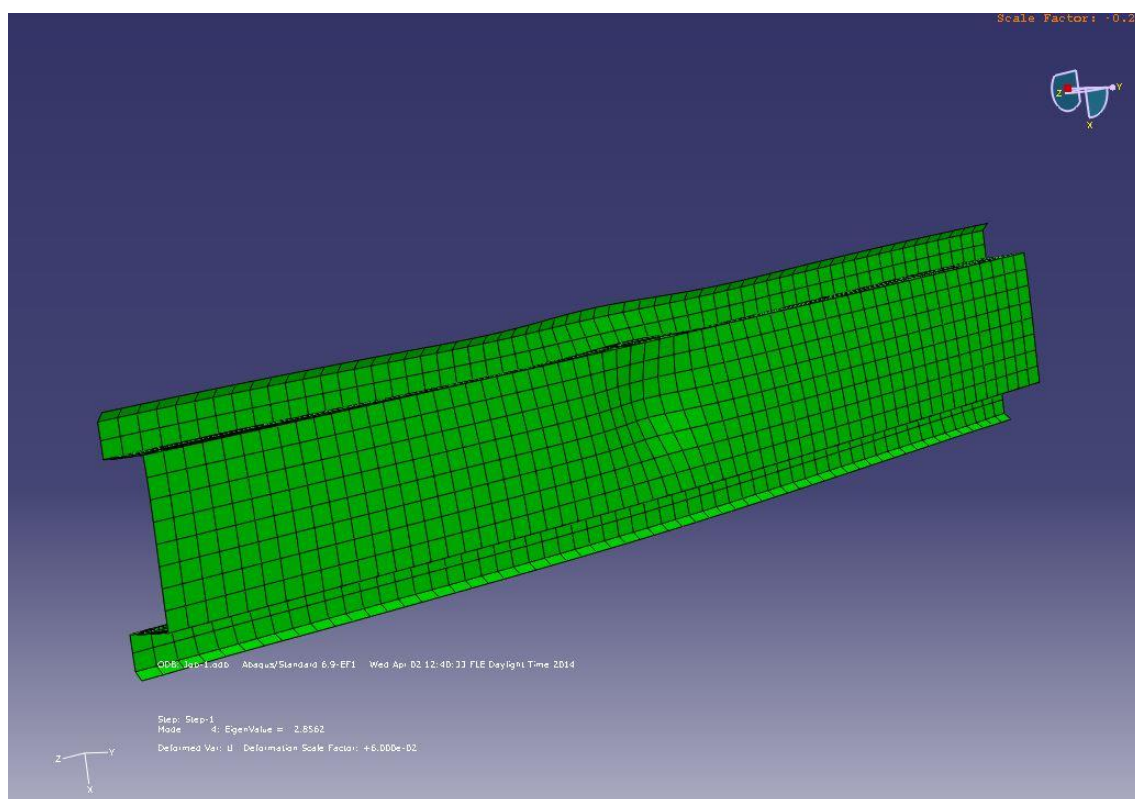
Kuvia tarkastellessa huomataan samanlaisia piirteitä lommahdusilmiön esiintymisessä. Tässä on tosin huomioitava että Abaqus-ohjelman piirtämät siirtymät ovat liioiteltuja. Silmämääräisen tarkastelun jälkeen voidaan todeta lommahdustavan olevan sama molemmissa tapauksissa.

Seuraavaksi analysoidaan saatuja mittaustuloksia kuvasta 23 ja taulukosta 2. Havaitaan, että Abaqus-ohjelmalla saadaan jonkin verran pienempi tulos kuin mekaanisella testauksella on saatu. Tämä voi johtua siitä että oikeassa tilanteessa materiaalin ai-neenvahvuus saattaa olla jonkin verran suurempi kuin ilmoitettu tai materiaalin ominai-suudet ovat erilaiset kuin tiedoissa on ilmoitettu. Myös valmistusmenetelmä saattaa vaikuttaa tulosten eroavaisuuteen.

Seuraavaksi tarkastellaan hattuprofiilia y-suuntaisessa kuormituksessa. Tarkastellaan silmämääräisesti aluksi mekaanisesta ja tietokonesimulaatiosta saatuja tuloksia, y-suuntaisessa kuormituksessa 600 mm:n jakovälillä, kuvissa 35 ja 36.



Kuva 35 XHTL 25/70 -hattuprofiiliruoteen y-suuntainen testi 600 mm:n jakovälillä



Kuva 36 Abaqus-ohjelmalla suoritettu testi XHTL 25/70 -hattuprofiiliruoteelle (y-suuntaisesti ja 600 mm:n jakovälillä)

Kuvia tarkastellessa huomataan samanlaisia piirteitä lommahdusilmiön esiintymisessä. Huomioitavaa tässä on, että hattuprofiiliruoteen pikkulaippa lommahtaa eri suuntiin. Tämä johtuu siitä, että lommahdus voi sattua kumpaakin suuntaan yhtä todennäköisesti. Silmämääräisen tarkastelun jälkeen voidaan todeta lommahdustavan olevan sama molemmissa tapauksissa.

Seuraavaksi analysoidaan saatuja mittaustuloksia taulukoista 4 ja 6. Havaitaan että Abaqus-ohjelmalla saadaan jonkin verran suurempi tulos kuin mekaanisella testauksella on saatu. Tämä voi johtua mm. siitä, että valmistusmenetelmä saattaa vaikuttaa tulosten eroavaisuuteen. Rullamuovatussa profiilissa saattaa olla venymiä, mikä on saattanut aiheutua rullamuovausprosessissa tai rei'itettäessä peltiä. Myös profiilin poikkipinta-ala saattaa olla todellisessa tilanteessa erilainen kuin simuloidussa. Profiilin kulmat voivat esim. olla pyöreämpiä, mikä saattaa heikentää rakennetta jonkin verran.

Voidaan todeta että XHTL 25/70 hattuprofiiliruoteen testit ja simulaatiot vastaavat toisiinsa tarpeeksi tarkasti. Syitä eroavaisuuksiin voivat olla mm. reunaehdot testin ja Abaqus-ohjelman välillä tai se, että liikutaan lähellä myötörajaa.

7 Yhteenveto

7.1 Työn tulokset

Työn tavoitteena oli siis suunnitella ja valmistaa testipenkki hattuprofiilien lommahdus-analyysiä varten sekä suorittaa testit kahdelle hattuprofiilityypille. Hattuprofiilien testausta varten tarvittiin myös testaus standardi. Testien tuloksia verrattaisiin Abaqus FEA-ohjelmalla suoritettuihin simulaatioihin.

Testien lopulliset tulokset on esitetty taulukoissa 3 ja 4. Taulukossa 3 on huomioitava 600 mm:n jännevälin y-suuntaisen testin tulos. Tulos poikkeaa huomattavasti muista, koska testissä hattuprofiili alkoi leikkautua ennen lommahdusta. Syy profiilin leikkautumiseen johtuu mahdollisesti siitä, että liikutaan materiaalin myötörajan lähellä.

Taulukko 3 HTL 25/70, testien tulokset

HTL 25/70 x 0,7			
Kuormitus-suunta	Jänneväli (mm)	Testeistä saatu lommahdusvoima, F_{kr} (kN)	Simulaatiosta saatu lommahdusvoima, F_{kr} (kN)
X-suunta	600	1,736	1,219
	1000	1,085	0,706
	1200	0,868	0,583
Y-suunta	600	4,341 !	7,447
	1000	3,328	3,941
	1200	2,894	3,017

Taulukko 4 XHTL 25/70 Xelent, testien tulokset

XHTL 25/70 x 0,7 Xelent			
Kuormitus-suunta	Jänneväli (mm)	Testeistä saatu lommahdusvoima F_{kr} (kN)	Simulaatiosta saatu lommahdusvoima F_{kr} (kN)
X-suunta	600	1,158	0,525
	1000	0,868	0,299
	1200	0,796	0,247
Y-suunta	600	2,749	5,712
	1000	2,315	3,382
	1200	2,027	2,607

Työn lopputuloksena saatiin suunniteltua ja valmistettua testauspenkki, joka toteuttaa standardin Eurocode 3 EN 1993-1-3 vaatimukset kylmämuovattujen sauvojen testaamisesta. Hattuprofiileille on siis hankittu testausstandardi, jota voidaan käyttää tuotteen CE-merkinnässä. Testauspenkillä suoritettiin testit HTL 25/70- ja XHTL 25/70 Xelent-profiileille. Testien mittaustuloksia verrattiin Dassault Systems Abaqus FEA-tietokonesimulaatio-ohjelmasta saatuihin tuloksiin. Vertaamalla tuloksia selvisi, että osassa mittaustuloksia esiintyy poikkeavuutta. Poikkeavuudet johtuvat mahdollisesti siitä, että testeissä liikutaan materiaalin myötörajäjännityksen lähellä.

Tämän opinnäytetyön lopputulosten perusteella voidaan ehdottaa seuraavia jatkotutkimustarpeita ja jatkotoimenpiteitä. Tietokonesimulaatiolla tulisi selvittää profiilin myötöraja staattisen analyysin avulla. Tämä analyysin avulla saadaan mahdollisesti HTL 25/70-profiilin 600 mm:n y-suuntaisen testin tuloksen poikkeavuus selvitettyä. Testejä voidaan myös jatkaa mekaanisesti käyttämällä paksumpia materiaalin aineenvahvuuksia.

7.2 Työn arviointi

Opinnäytetyö on kokonaisuutena suuri projekti, ja sen tekeminen voi osoittautua erittäin haasteelliseksi. Opinnäytetyön aihe tuli esille ollessani työharjoittelussa yrityksessä kesällä 2013. Alkutaipaleen ongelmaksi saattaa jo aiheutua aiheen valinta ja rajaus. Tähän valintaan ja rajaukseen voi tuoda lisävaikeutta se, että yritys tai työn teettäjä ei

suoranaisesti määrää tiettyä aihetta opinnäytetyötä tekeväälle. Itselleni tämä aihe oli yksi monista mahdollisista. Aiheen mielenkiintoisuus ja haasteellisuus kuitenkin kiehtoi minua. Erikoiseksi aiheen tekee se vähäinen tietomäärä, joka aiheesta löytyy, ja ylipäättään rullamuovausta suorittavien yritysten vähäinen määrä Suomessa. Työn rajaamisen oli seuraavaksi päätettävä asia, ja ennen työn aloittamista sen laajuutta oli vaikea käsittää. Työn rajaaminen vei oman aikansa, mutta lopuksi kaikki osapuolet olivat tyytyväisiä työn alueeseen. Omasta mielestäni alueen rajaaminen onnistui lopulta oikein hyvin.

Aikataulun kanssa törmäsin jonkin verran haasteisiin, koska olin samanaikaisesti myös töissä kyseisessä yrityksessä. Oli viikkoja, jolloin saatoinkin rauhassa tehdä opinnäytetyötäni, ja sitten taas välillä tuntui, että aika saattaisi loppua kesken. Aiheeni takia jouduin myös liikkumaan paljon työpaikan ja koulun välillä, mikä myös omalla tavalla vaikeutti työn tekemistä.

Hattuprofiileihin ja rullamuovaukseen liittyi paljon tietoa, jota ei löydy kirjallisuudesta. Tästä johtuen lähteenä onkin pääasiassa Aulis Lundellin tiedot ja kokemus rullamuovauksesta ja profiileista. Kävimme läpi hattuprofiilien ominaisuuksia, käyttökohteita ja valmistusmenetelmiä. Hattuprofiilin muoto ja ominaisuudet asettivat omat vaatimukset testauspenkin suunnittelulle.

Tämä opinnäytetyö on minulle ensimmäisiä laajempia töitä, joita olen joutunut yksin tekemään. Työ on ollut mielenkiintoista sekä haasteellista ja olen myös oppinut paljon erilaisia asioita. Työtä tehdessä olenkin joutunut soveltamaan monia koulussa opittuja asioita ja muistelemaan ensimmäisten opiskeluvuosien oppeja. Tämän tyyppiset opinnäytetyöt ovat oiva kertaus ja opetusmenetelmä myöhempää työtä ajatellen.

Lähteet

Dassaul Systems (3ds). 2014. Verkkodokumentti. <www.3ds/products-services/simulia/portfolio/abaqus/abaqus-portfolio/abaquscae/>. Luettu 20.4.2014

Eurocode 3 EN 1993–1–3 + AC Teräsrakenteiden suunnittelu – Yleist säännöt – Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. Liite A, kohta 3.1, s. 103.

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 305/2011. Rakennustuoteasetus.

Karhunen, Jouko. 2006. Lujuusoppi. 10. painos. Espoo: Otatieto Oy.

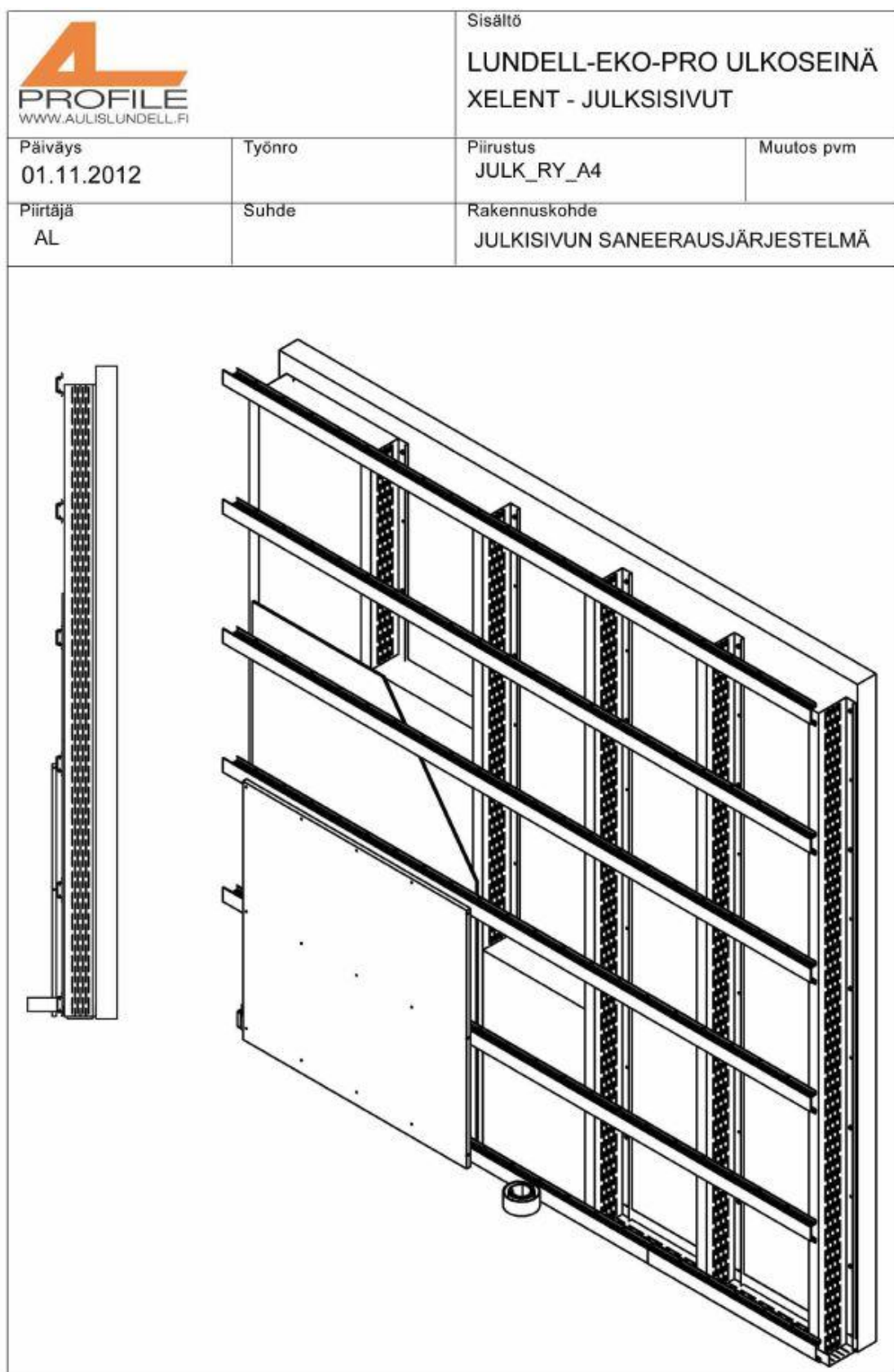
Kurowski, Paul M. 2004. Finite Element Analysis for Design Engineers. SAE International.

Lundell, Aulis. 2014. Yrityksen perustaja ja hallituksen puheenjohtaja, Aulis Lundell Oy, Saukkola. Haastattelu 11.4.2014.

Tekniikan kaavasto. 2010. 7. painos. Tampere: Tammertekniikka / AMK-kustannus Oy.

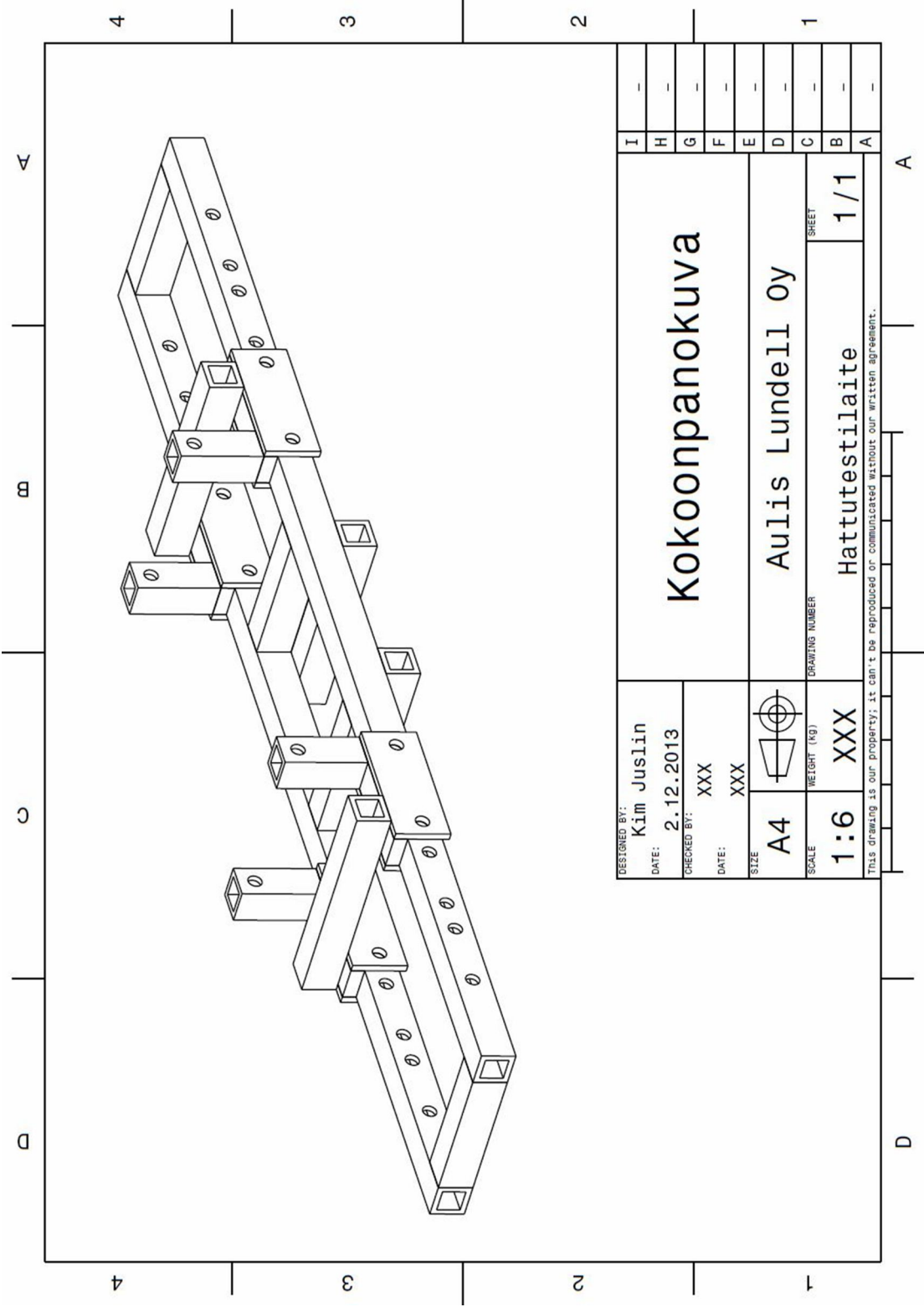
Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). 2013. Verkkodokumentti. <<http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Kuluttajaturvallisuus/CE-merkki/>>. Luettu 7.4.2014

Aulis Lundell Oy:n Lundell – EKO – Pro Ulkoseinä

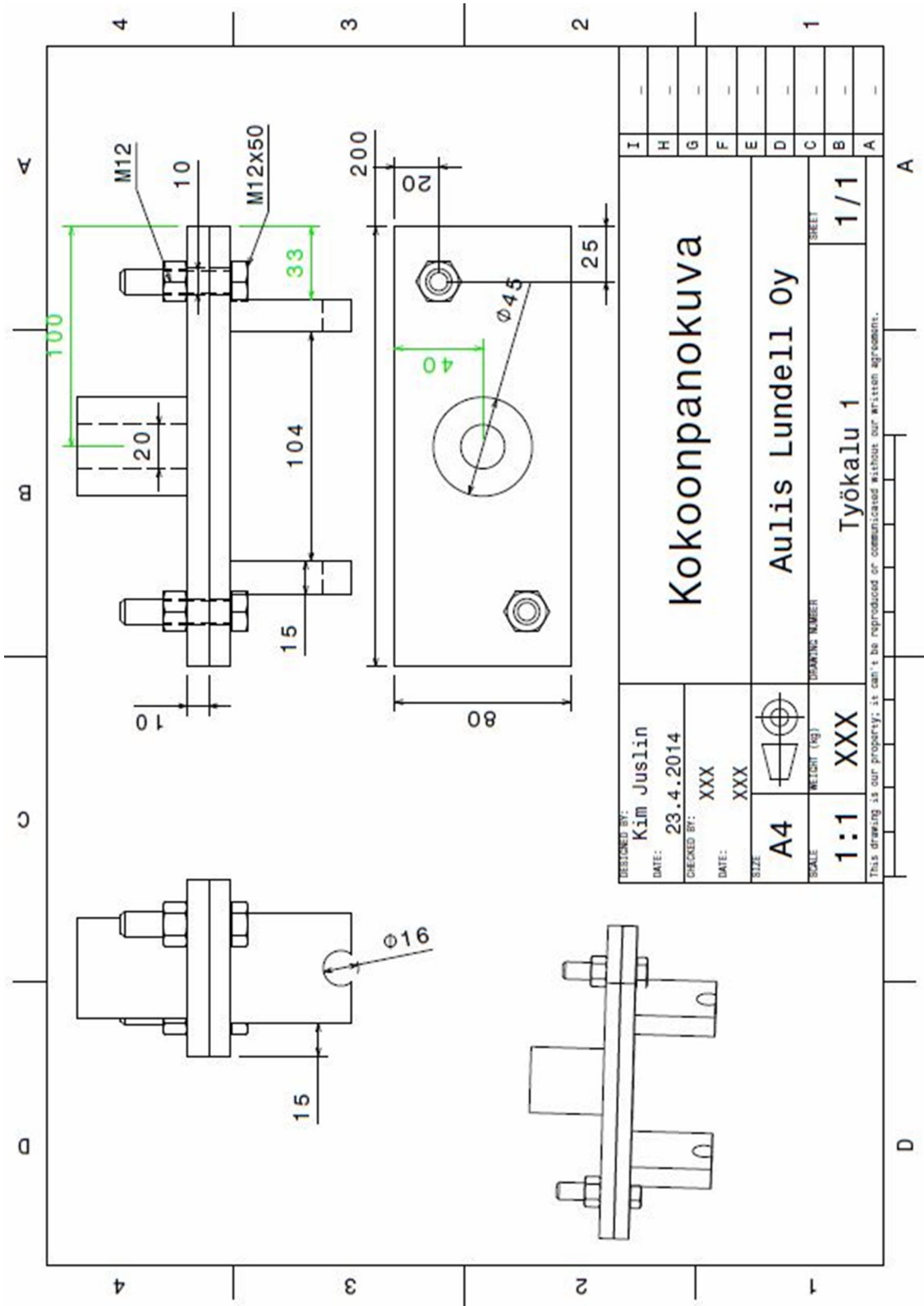


Hattutestilaitteen kokoonpanokuvat

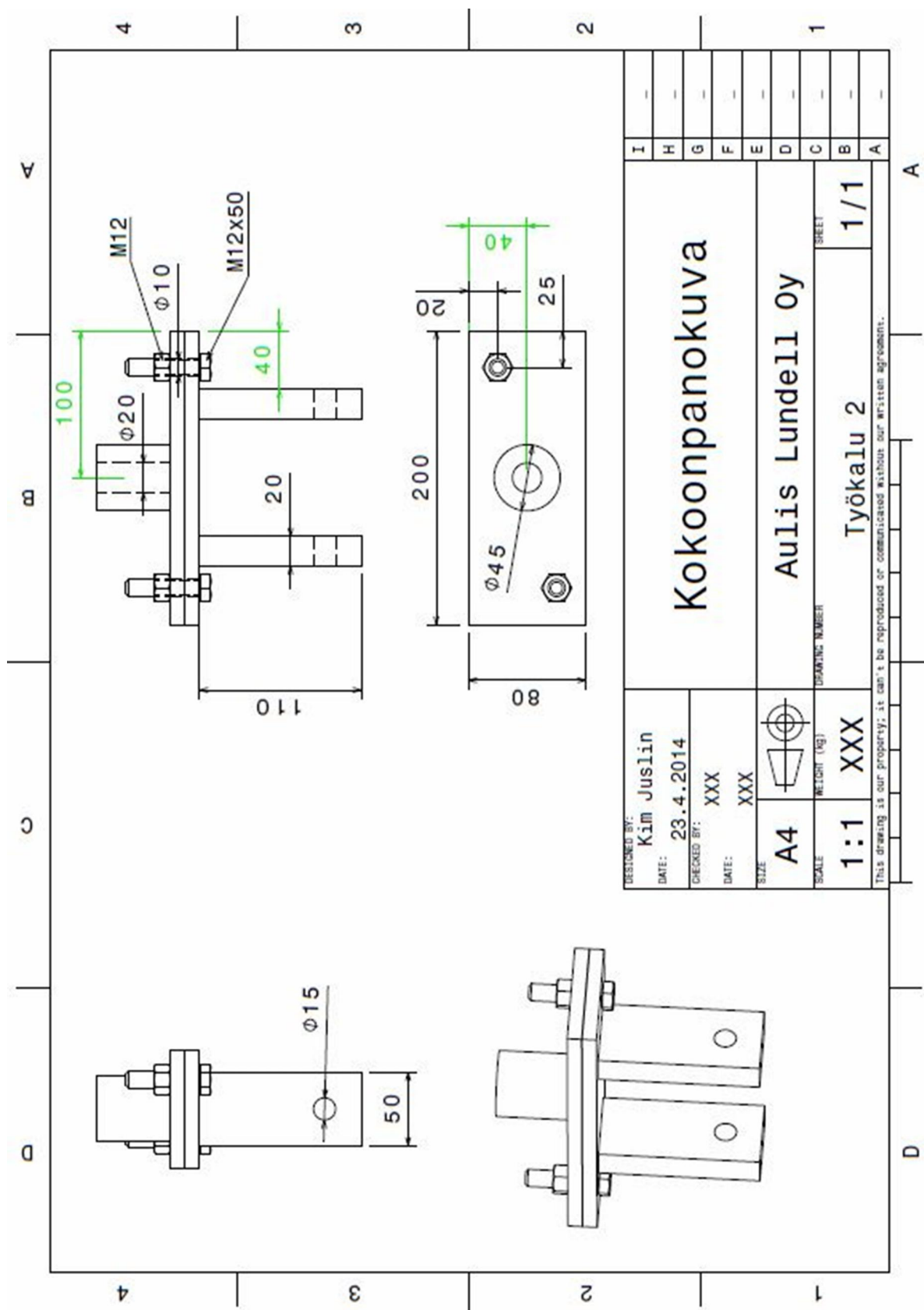
Hattutestipenkki



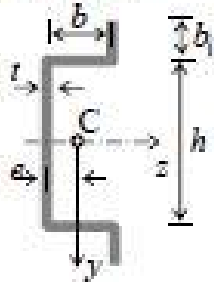
Taivutustyökalu kuormitus suunnalle x



Taivutustyökalu kuormitusuunnalle y



Ohjeet Abaqus-simulaation luomiseen

<p>3. Hattuprofiili</p> 	$e = \frac{b^2 + 2bb_1}{h + 2b + 2b_1}$ $I_y = \frac{tb^3}{6} + 2tb \cdot \left(\frac{b}{2} - e\right)^2 + th e^2 + 2tb_1 (b - e)^2$ $I_z = \frac{th^3}{12} + \frac{tb_1^3}{6} + 2tb_1 \left(\frac{h}{2} + \frac{b_1}{2}\right)^2 + 2tb \left(\frac{h}{2}\right)^2$
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

$E = 210 \text{ GPa}$

$\nu = 0,3$

$L = 600, 1000 \text{ ja } 1200 \text{ mm}$

$h = 69,3 \text{ mm}$

$b = 23,6 \text{ mm}$

$t = 0,7 \text{ mm}$

$F = 2000 \text{ N}$

Tehtävän ratkaiseminen Abaqus-ohjelmalla

Esikäsittely

Käynnistys

1. Käynnistetään esikäsittelijä Abaqus CAE ja luodaan uusi malli (Create New Database).
2. Valitaan käytettävä yksikköjärjestelmä. Tämä määrää, missä yksiköissä koordinaatit ja voimat annetaan. Käytetään SI-yksiköitä. Abaqus ei tiedä, mitä yksikköjärjestelmää on käytetty; joten siitä on itse huolehdittava!

Geometriamalli

3. Luodaan uusi osa (Create Part). Tämän komennon voi käynnistää ainakin neljällä eri tavalla.
4. Avautuvaan ikkunaan (Create Part) annetaan osalle nimi ja arvio poikkileikkauksen maksimidimensiosta (Approximate size) 0.6 (mm). Osa mallinnetaan kuorena (Shell)
5. Hahmotellaan poikkileikkaus viivatyökalulla (Create Lines: Connected). Komennon voi lopettaa hiiren keskinäppäimellä. Huomataan, että mitat h ja b ovat keskimittoja levyn keskiviivasta lähtien. Kun poikkileikkaus on valmis ja oikein mitoitettu, painetaan Done.
6. Pursotetaan poikkileikkausta profiilin pituuden verran.

7. Profiiliin luodaan ositus (Partition on face). Ositus tehdään kuormitus suunnasta riippuen profiilin selkään (Y-suunta) tai molempien pystylaippojen keskelle (X-suunta). Ositus tehdään jotta myöhemmin saadaan kiinnitettyä pisteväily. Ositus hahmotellaan viivatyökalulla (Create Lines: Connected). Kun ositus on valmis, painetaan Done.
8. Tallenna (File → Save).

Materiaalivakiot

9. Luodaan materiaali (Create Material), jolle määritetään nimi ja tarvittavat materiaalivakiot: kimmomoduulin ja Poissonin luvun (Mechanical → Elasticity → Elastic).

Fysikaaliset vakiot

10. Määritetään osan materiaali ja mahdolliset muut fysikaaliset ominaisuudet (Create Section). Annetaan ominaisuudelle nimi. Koska osa on kuori (shell), annetaan materiaalin aineenvahvuus (Continue). Valitaan osan materiaali.

Ominaisuuksien liittäminen malliin

11. Liitetään osaan materiaali ja mahdolliset muut fysikaaliset ominaisuudet (Section Assignment). Valitaan kappale hiirellä klikkaamalla (Done). Hyväksytään luotu ominaisuus (OK).

Kokoonpano

12. Malli voi sisältää monta osaa, mutta vain yhden kokoonpanon. Tässä tehtävässä palkista luodaan vain yksi kopio (instance). (Assembly → Instances). Hyväksytään osa (OK).

Analyysityypin määrittäminen

13. Luodaan analyysiaskel, jossa voima annetaan keskelle profiilia (Steps). Annetaan askeleelle nimi. Valitaan analyysityypiksi Linear perturbation, Buckle (Continue → OK).

Laskettavat tulokset

14. Tutkitaan laskettavien tulosten oletusarvot (Field Output Requests tai History Output Requests). Hiiren oikealla näppäimellä valitaan Manager. Sen jälkeen Edit. Ei tehdä mitään muutoksia (Cancel, Dismiss).

Reunaehdot

15. Kiinnitetään profiilin molemmat päät jäykästi kiinni. (BCs). Reunaehto nimetään. Reunaehto aktivoidaan ensimmäisellä analyysiaskeleella (Step: Initial). Valitaan Displacement/Rotation. Valitaan hiirellä kiinnitettävä taso (Done). Lukitaan kappale valitsemalla kaikki liike- ja pyörähdys suunnat (Done).

Kuormat

16. Asetetaan pistevoima profiilin keskelle (Loads). Voima nimetään. Voima annetaan analyysiaskeleella (Step). Valitaan kuorman tyyppi (Concentrated Force). Valitaan hiirellä piste, johon voima vaikuttaa (Done). Annetaan voiman suuruus etumerkkeineen oikean suunnan kohdalle.

Elementtiverkon luominen

17. Voidaan tutkia ja valita käytettävän verkotustavan (Mesh → Controls).
18. Valitaan elementtityyppi (Mesh → Element type). Valitaan Incompatible modes. Elementtityyppi on S4.
19. Valitaan elementtiverkon tiheys (Seed → Part). Määritetään elementin koko, käytetään 0.01 (m).
20. Luodaan elementtiverkko (solmut ja elementit) (Mesh → Part).

Ratkaisu

21. Määritetään työvaiheet (Jobs). Annetaan työlle nimi.
22. Lähetetään työ ratkaisijalle (Valitaan työ ja hiiren oikealla näppäimellä valitaan Submit).
23. Tarkastellaan työn etenemistä (Valitaan työ ja hiiren oikealla näppäimellä valitaan Monitor).
24. Tarkistetaan virheilmoitukset ja varoitukset (Errors, Warnings).

Jälkikäsittely

Kun ratkaisu on valmis, tuloksia voidaan tarkastella. Aluksi ladataan tulokset.

25. Ladataan tulokset (Valitaan työ ja hiiren oikealla näppäimellä valitaan Results).
26. Piirretään siirtymätila (Plot → Deformed shape) ja katsotaan onko se järkevä. Huomioidaan vääntymä.
27. Tutkitaan hattuprofiiliin lommahdukseen tarvittavan voiman suuruus (Result → Field Output). Analyysistä saadaan ohjelman laskema EigenValue luku. EigenValue luku kerrotaan analyysissä käytetyn kuormituksen määrällä (tässä tapauksessa 2000N). Näin saadaan arvo hattuprofiiliin lommahdusvoimalle. Tämän jälkeen verrataan saatua tulosta mitattuun tulokseen.

Mittauspöytäkirjat



Mittauspöytäkirja

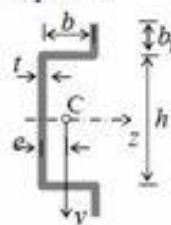
1/13

Mittauspöytäkirja Aulis Lundell Oy:n hattulistan lommahdustestaus
Testi on suoritettu Eurocode 3 EN 1993-1-3-standardin mukaisesti.

Lähtötiedot:

Testi suoritetaan 25/70 x 0,7 hattulistalle. Testissä suoritettavat mittaukset tehdään sekä x-että y-taivutussuuntiin. Mitattavat jännevälit ovat 600 mm, 1000 mm ja 1200 mm.

3. Hattuprofiili



$$e = \frac{b^2 + 2bb_1}{h + 2b + 2b_1}$$

$$I_y = \frac{tb^3}{6} + 2tb \cdot \left(\frac{b}{2} - e\right)^2 + t h e^2 + 2tb_1(b - e)^2$$

$$I_z = \frac{th^3}{12} + \frac{tb^3}{6} + 2tb_1\left(\frac{h}{2} + \frac{b_1}{2}\right)^2 + 2tb\left(\frac{h}{2}\right)^2$$

Hattulistan mitat:

	mm		mm
Selkä:	70	h	69,3
Sivut:	25	b	23,6
Laipat:	20	b1	19,65
ainevahvuus:	0,7	t	0,7
		e	9,52786

Jähyysmomentit:

	mm ⁴	mm ⁴
I _x (kuvan I _y):	11555,4841	1,16E+04
I _y (kuvan I _z):	114383,304	1,14E+05

Taivutusvastus:

	mm ³	mm ³
W _x :	1212,8105	1,21E+03
W _y :	2106,50652	2,11E+03

L=lommahdus

Click to add footer



Mittauspöytäkirja

2113

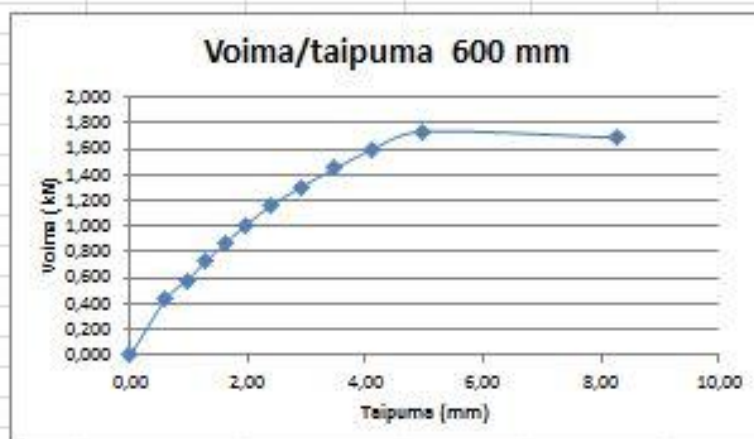
X-suunta	600 mm	koe 1			
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
39,9	0,1	6	434,074	0,43407	
39,62	0,38	8	578,765	0,57876	
39,32	0,68	10	723,456	0,72346	
38,98	1,02	12	868,147	0,86815	
38,65	1,35	14	1012,84	1,01284	
38,19	1,81	16	1157,53	1,15753	
37,72	2,28	18	1302,22	1,30222	
37,1	2,9	20	1446,91	1,44691	
36,46	3,54	22	1591,6	1,5916	
35,31	4,69	24	1736,29	1,73629 L	
30,55	9,45	22	1591,6	1,5916	
		koe 2			
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
39,02	0,98	6	434,074	0,43407	
38,57	1,43	8	578,765	0,57876	
38,29	1,71	10	723,456	0,72346	
37,92	2,08	12	868,147	0,86815	
37,56	2,44	14	1012,84	1,01284	
37,17	2,83	16	1157,53	1,15753	
36,64	3,36	18	1302,22	1,30222	
36,1	3,9	20	1446,91	1,44691	
35,54	4,46	22	1591,6	1,5916	
34,86	5,14	24	1736,29	1,73629	
33,91	6,09	26	1880,99	1,88099 L	
31,5	8,5	24	1736,29	1,73629	
		koe 3			
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
39,27	0,73	6	434,074	0,43407	
38,93	1,07	8	578,765	0,57876	
38,57	1,43	10	723,456	0,72346	
38,25	1,75	12	868,147	0,86815	
37,88	2,12	14	1012,84	1,01284	
37,48	2,52	16	1157,53	1,15753	
36,94	3,06	18	1302,22	1,30222	
36,38	3,62	20	1446,91	1,44691	
35,7	4,3	22	1591,6	1,5916	
34,89	5,11	24	1736,29	1,73629 L	
30,76	9,24	22	1591,6	1,5916	



Mittauspöytäkirja

4/13

Taipuma (mm)	Voima (kN)
0,00	0,000
0,60	0,434
0,96	0,579
1,27	0,723
1,62	0,868
1,97	1,013
2,33	1,158
2,90	1,302
3,47	1,447
4,10	1,592
4,38	1,736
8,26	1,688





Mittauspöytäkirja

5/13

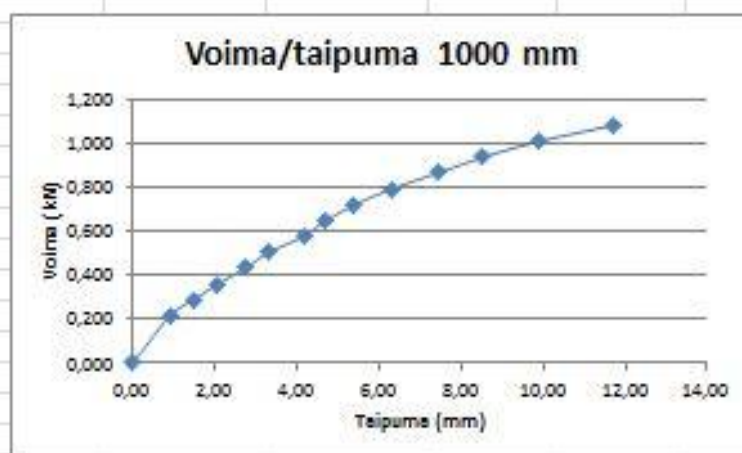
X-suunta					
1000 mm		koe 1			
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
38,81	1,19	3	217,037	0,21704	
38,12	1,88	4	289,382	0,28938	
37,46	2,54	5	361,728	0,36173	
36,84	3,16	6	434,074	0,43407	
36,14	3,86	7	506,419	0,50642	
35,35	4,65	8	578,765	0,57876	
34,83	5,17	9	651,11	0,65111	
33,86	6,14	10	723,456	0,72346	
32,87	7,13	11	795,802	0,7958	
31,68	8,32	12	868,147	0,86815	
30,45	9,55	13	940,493	0,94049	
28,84	11,16	14	1012,84	1,01284	
26,72	13,28	15	1085,18	1,08518	L
koe 2					
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
39,04	0,96	3	217,037	0,21704	
38,42	1,58	4	289,382	0,28938	
37,82	2,18	5	361,728	0,36173	
37,03	2,97	6	434,074	0,43407	
36,6	3,4	7	506,419	0,50642	
35,41	4,59	8	578,765	0,57876	
34,97	5,03	9	651,11	0,65111	
34,45	5,55	10	723,456	0,72346	
33,68	6,32	11	795,802	0,7958	
32,54	7,46	12	868,147	0,86815	
31,68	8,32	13	940,493	0,94049	
30,7	9,3	14	1012,84	1,01284	
29,27	10,73	15	1085,18	1,08518	L
koe 3					
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
39,43	0,57	3	217,037	0,21704	
39,01	0,99	4	289,382	0,28938	
38,5	1,5	5	361,728	0,36173	
37,92	2,08	6	434,074	0,43407	
37,29	2,71	7	506,419	0,50642	
36,77	3,23	8	578,765	0,57876	
36,08	3,92	9	651,11	0,65111	
35,47	4,53	10	723,456	0,72346	
34,52	5,48	11	795,802	0,7958	
33,47	6,53	12	868,147	0,86815	
32,23	7,77	13	940,493	0,94049	
30,75	9,25	14	1012,84	1,01284	
28,9	11,1	15	1085,18	1,08518	L



Mittauspöytäkirja

7/13

Taipuma (mm)	Voima (kN)
0,00	0,000
0,91	0,217
1,48	0,289
2,07	0,362
2,74	0,434
3,32	0,506
4,16	0,579
4,71	0,651
5,41	0,723
6,31	0,796
7,44	0,868
8,55	0,940
9,90	1,013
11,70	1,085





Mittauspöytäkirja

8/13

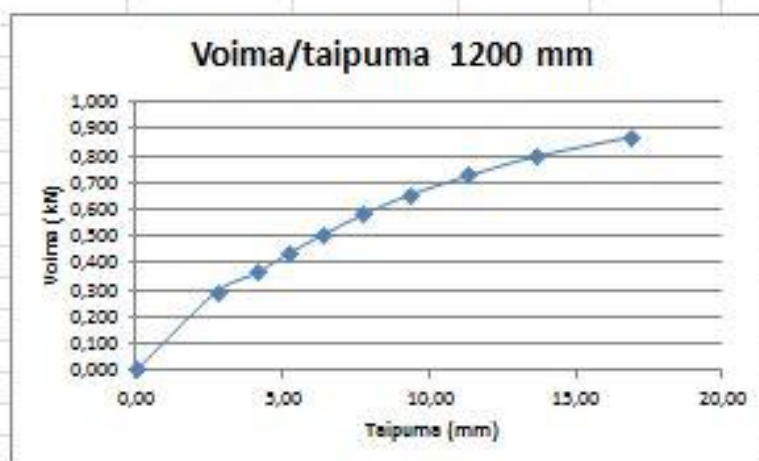
X-suunta					
1200 mm		koe 1			
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
38,33	1,67	4	289,382	0,28938	
37,02	2,98	5	361,728	0,36173	
36,35	3,65	6	434,074	0,43407	
35,36	4,64	7	506,419	0,50642	
33,96	6,04	8	578,765	0,57876	
32,48	7,52	9	651,11	0,65111	
30,55	9,45	10	723,456	0,72346	
28,07	11,93	11	795,802	0,7958	
26,22	13,78	12	868,147	0,86815	L
		koe 2			
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
36,45	3,55	4	289,382	0,28938	
35,18	4,82	5	361,728	0,36173	
33,8	6,2	6	434,074	0,43407	
32,23	7,77	7	506,419	0,50642	
30,94	9,06	8	578,765	0,57876	
29,57	10,43	9	651,11	0,65111	
27,36	12,64	10	723,456	0,72346	
25,18	14,82	11	795,802	0,7958	
21,15	18,85	12	868,147	0,86815	L
		koe 3			
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
37,07	2,93	4	289,382	0,28938	
35,52	4,48	5	361,728	0,36173	
34,31	5,69	6	434,074	0,43407	
33,27	6,73	7	506,419	0,50642	
31,94	8,06	8	578,765	0,57876	
30,14	9,86	9	651,11	0,65111	
28,25	11,75	10	723,456	0,72346	
25,95	14,05	11	795,802	0,7958	
22,22	17,78	12	868,147	0,86815	L



Mittauspöytäkirja

10/13

Taipuma (mm)	Voima (kN)
0,00	0,000
2,72	0,289
4,09	0,362
5,18	0,434
6,38	0,506
7,72	0,579
9,27	0,651
11,28	0,723
13,60	0,796
16,80	0,868

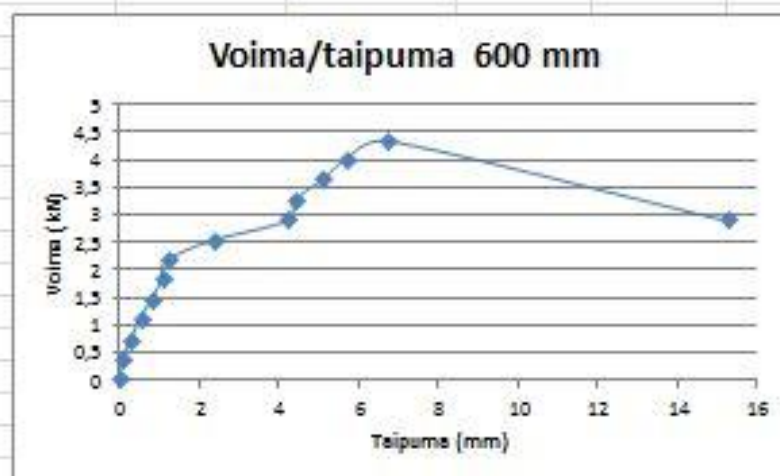




Mittauspöytäkirja

11/13

Y-suunta	600 mm				
	Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)	
	0	0	0	0	
	0,04	5	361,728	0,36173	
	0,28	10	723,456	0,72346	
	0,5	15	1085,18	1,08518	
	0,78	20	1446,91	1,44691	
	1,06	25	1808,64	1,80864	
	1,18	30	2170,37	2,17037	
	2,33	35	2532,1	2,5321	
	4,21	40	2893,82	2,89382	
	4,4	45	3255,55	3,25555	
	5,05	50	3617,28	3,61728	
	5,65	55	3979,01	3,97901	
	6,71	60	4340,74	4,34074	
	15,2	40	2893,82	2,89382	leikkautuminen

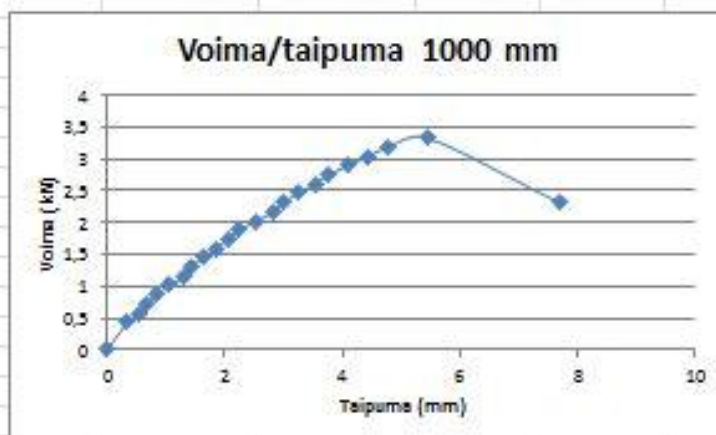




Mittauspöytäkirja

12/13

1000 mm				
Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)	
0	0	0	0	
0,35	6	434,074	0,43407	
0,55	8	578,765	0,57876	
0,68	10	723,456	0,72346	
0,84	12	868,147	0,86815	
1,07	14	1012,84	1,01284	
1,3	16	1157,53	1,15753	
1,41	18	1302,22	1,30222	
1,64	20	1446,91	1,44691	
1,84	22	1591,6	1,5916	
2,05	24	1736,29	1,73629	
2,24	26	1880,99	1,88099	
2,53	28	2025,68	2,02568	
2,83	30	2170,37	2,17037	
3	32	2315,06	2,31506	
3,24	34	2459,75	2,45975	
3,54	36	2604,44	2,60444	
3,75	38	2749,13	2,74913	
4,1	40	2893,82	2,89382	
4,43	42	3038,52	3,03852	
4,78	44	3183,21	3,18321	
5,45	46	3327,9	3,3279	
7,68	32	2315,06	2,31506	





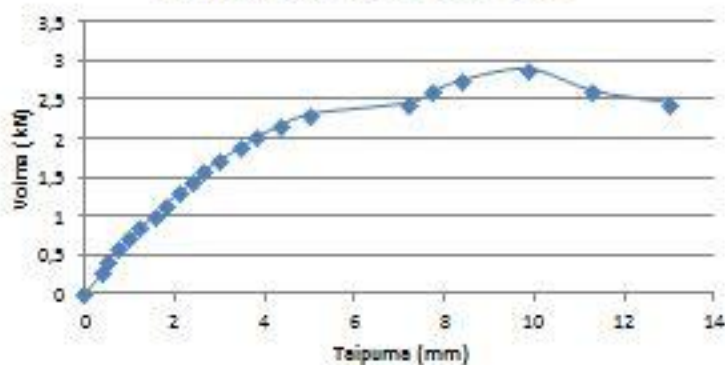
Mittauspöytäkirja

13/13

1200 mm

Taipuma (mm)	Paine (Bar)	Voima (N)	Voima (kN)
0	0	0	0
0,43	4	289,382	0,28938
0,54	6	434,074	0,43407
0,75	8	578,765	0,57876
1	10	723,456	0,72346
1,25	12	868,147	0,86815
1,6	14	1012,84	1,01284
1,82	16	1157,53	1,15753
2,1	18	1302,22	1,30222
2,42	20	1446,91	1,44691
2,68	22	1591,6	1,5916
3,04	24	1736,29	1,73629
3,47	26	1880,99	1,88099
3,86	28	2025,68	2,02568
4,38	30	2170,37	2,17037
5,03	32	2315,06	2,31506
7,24	34	2459,75	2,45975
7,76	36	2604,44	2,60444
8,39	38	2749,13	2,74913
9,87	40	2893,82	2,89382
11,32	36	2604,44	2,60444
13,05	34	2459,75	2,45975

Voima/taipuma 1200 mm





Mittauspöytäkirja

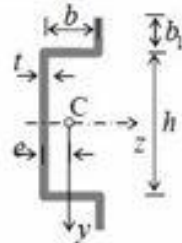
1/13

Mittauspöytäkirja Aulis Lundell Oy:n hattulistan lommahdustestaus
Testi on suoritettu Eurocode 3 EN 1993-1-3-standardin mukaisesti.

Lähtötiedot:

Testi suoritetaan 25/70 x 0,7 hattulista ruoteelle Xelent rei'ityksellä. Testissä suoritettavat mittaukset tehdään sekä x- että y-taivutussuuntiin. Mitattavat jännevälit ovat 600 mm, 1000 mm ja 1200 mm.

3.Hattuprofiili



$$e = \frac{b^2 + 2bt_1}{h + 2b + 2t_1}$$

$$I_y = \frac{tb^3}{6} + 2tb \cdot \left(\frac{b}{2} - e\right)^2 + the^2 + 2tb_1(b - e)^2$$

$$I_z = \frac{th^3}{12} + \frac{tb_1^3}{6} + 2tb_1\left(\frac{h}{2} + \frac{b_1}{2}\right)^2 + 2tb\left(\frac{h}{2}\right)^2$$

Hattulistan mitat:

	mm		mm
Selkä:	70	h	69,3
Sivut:	25	b	23,6
Laipat:	20	b1	19,65
ainevahvuus:	0,7	t	0,7
		e	9,5279

Jäyhyysmomentit:

	mm ⁴	mm ⁴
I _x (kuvasa ly)	11555,4841	1,16E+04
I _y (kuvasa lz)	114383,304	1,14E+05

Taivutusvastus:

	mm ³	mm ³
W _x :	1212,8105	1,21E+03
W _y :	2106,50652	2,11E+03

L=lommahdus



UNDELL OY				
X-suunta	600 mm	koe 1		
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Ba	Voima (N	Voima (kN)
40	0	0	0	0
37,44	2,56	4	289,38	0,2894
36,67	3,33	6	434,07	0,4341
36,3	3,7	8	578,76	0,5788
35,71	4,29	10	723,46	0,7235
35,22	4,78	12	868,15	0,8681
34,51	5,49	14	1012,8	1,0128
33,51	6,49	16	1157,5	1,1575
32,15	7,85	18	1302,2	1,3022 L
koe 2				
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Ba	Voima (N	Voima (kN)
40	0	0	0	0
37,4	2,6	4	289,38	0,2894
36,88	3,12	6	434,07	0,4341
36,37	3,63	8	578,76	0,5788
35,78	4,22	10	723,46	0,7235
35,1	4,9	12	868,15	0,8681
34,14	5,86	14	1012,8	1,0128
32,65	7,35	16	1157,5	1,1575 L
koe 3				
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Ba	Voima (N	Voima (kN)
40	0	0	0	0
39,16	0,84	4	289,38	0,2894
38,58	1,42	6	434,07	0,4341
37,95	2,05	8	578,76	0,5788
37,22	2,78	10	723,46	0,7235
36,42	3,58	12	868,15	0,8681
34,75	5,25	14	1012,8	1,0128
33,92	6,08	16	1157,5	1,1575
32,85	7,15	18	1302,2	1,3022 L



Mittauspöytäkirja

4/13

X-suunta					
1000 mm		koe 1			
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Ba)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
38,9	1,1	4	289,38	0,2894	
37,8	2,2	5	361,73	0,3617	
37,09	2,91	6	434,07	0,4341	
36,2	3,8	7	506,42	0,5064	
35,42	4,58	8	578,76	0,5788	
34,59	5,41	9	651,11	0,6511	
33,6	6,4	10	723,46	0,7235	
32,65	7,35	11	795,8	0,7958	
31,4	8,6	12	868,15	0,8681	
29,75	10,25	13	940,49	0,9405	
26,79	13,21	14	1012,8	1,0128	L
		koe 2			
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Ba)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
37,77	2,23	4	289,38	0,2894	
37,15	2,85	5	361,73	0,3617	
36,15	3,85	6	434,07	0,4341	
35,44	4,56	7	506,42	0,5064	
34,57	5,43	8	578,76	0,5788	
33,48	6,52	9	651,11	0,6511	
32,3	7,7	10	723,46	0,7235	
31	9	11	795,8	0,7958	
29	11	12	868,15	0,8681	L
		koe 3			
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Ba)	Voima (N)	Voima (kN)	
40	0	0	0	0	
37,93	2,07	4	289,38	0,2894	
37,02	2,98	5	361,73	0,3617	
36,04	3,96	6	434,07	0,4341	
35,22	4,78	7	506,42	0,5064	
34,43	5,57	8	578,76	0,5788	
33,52	6,48	9	651,11	0,6511	
32,58	7,42	10	723,46	0,7235	
31,45	8,55	11	795,8	0,7958	
29,4	10,6	12	868,15	0,8681	L
27,97	12,03	10	723,46	0,7235	
26	14	9	651,11	0,6511	



Mittauspöytäkirja

5/13

	koe 1	koe 2	koe 3	keskiarvo		
Voimat	0	0	0	0		
	0,2893824	0,28938	0,2894	0,2894		
	0,361728	0,36173	0,3617	0,3617		
	0,4340736	0,43407	0,4341	0,4341		
	0,5064192	0,50642	0,5064	0,5064		
	0,5787648	0,57876	0,5788	0,5788		
	0,6511104	0,65111	0,6511	0,6511		
	0,723456	0,72346	0,7235	0,7235		
	0,7958016	0,7958	0,7958	0,7958		
	0,8681472	0,86815	0,8681	0,8681		
	koe 1	koe 2	koe 3	keskiarvo		
Taipuma	0	0	0	0		
	1,1	2,23	2,07	1,8		
	2,2	2,85	2,98	2,6767		
	2,91	3,85	3,96	3,5733		
	3,8	4,56	4,78	4,38		
	4,58	5,43	5,57	5,1933		
	5,41	6,52	6,48	6,1367		
	6,4	7,7	7,42	7,1733		
	7,35	9	8,55	8,3		
	8,6	11	10,6	10,067		
Taipuma (mm)	Voima (kN)					
0,00	0,000					
1,80	0,289					
2,68	0,362					
3,57	0,434					
4,38	0,506					
5,19	0,579					
6,14	0,651					
7,17	0,723					
8,30	0,796					
10,07	0,868					

Voima/taipuma 1000 mm

Taipuma (mm)	Voima (kN)
0,00	0,000
1,80	0,289
2,68	0,362
3,57	0,434
4,38	0,506
5,19	0,579
6,14	0,651
7,17	0,723
8,30	0,796
10,07	0,868



Mittauspöytäkirja

6/13

X-suunta		1200 mm	koe 1						
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Ba)	Voima (N)	Voima (kN)					
40	0	0	0	0					
38,53	1,47	3	217,04	0,217					
37,4	2,6	4	289,38	0,2894					
35,76	4,24	5	361,73	0,3617					
34,65	5,35	6	434,07	0,4341					
33,61	6,39	7	506,42	0,5064					
32,26	7,74	8	578,76	0,5788					
31,47	8,53	9	651,11	0,6511					
28,7	11,3	10	723,46	0,7235					
25,38	14,62	11	795,8	0,7958	L				
22,42	17,58	8	578,76	0,5788					
19,74	20,26	8	578,76	0,5788					
koe 2									
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Ba)	Voima (N)	Voima (kN)					
40	0	0	0	0					
38,3	1,7	3	217,04	0,217					
37,29	2,71	4	289,38	0,2894					
36,5	3,5	5	361,73	0,3617					
35,43	4,57	6	434,07	0,4341					
34,31	5,69	7	506,42	0,5064					
33,08	6,92	8	578,76	0,5788					
31,45	8,55	9	651,11	0,6511					
29,38	10,62	10	723,46	0,7235					
26,58	13,42	11	795,8	0,7958	L				
20,29	19,71	8	578,76	0,5788					
17,38	22,62	8	578,76	0,5788					
koe 3									
y (mm)	Taipuma (mm)	Paine (Ba)	Voima (N)	Voima (kN)					
40	0	0	0	0					
38,5	1,5	3	217,04	0,217					
36,86	3,14	4	289,38	0,2894					
35,94	4,06	5	361,73	0,3617					
34,87	5,13	6	434,07	0,4341					
33,52	6,48	7	506,42	0,5064					
32,32	7,68	8	578,76	0,5788					
30,54	9,46	9	651,11	0,6511					
29,28	10,72	10	723,46	0,7235					
26,55	13,45	11	795,8	0,7958					
21,34	18,66	9	651,11	0,6511					
18,06	21,94	8	578,76	0,5788					

Voimat				
	koe 1	koe 2	koe 3	keskiarvo
	0	0	0	0
	0,2170368	0,21704	0,217	0,217
	0,2893824	0,28938	0,2894	0,2894
	0,361728	0,36173	0,3617	0,3617
	0,4340736	0,43407	0,4341	0,4341
	0,5064192	0,50642	0,5064	0,5064
	0,5787648	0,57876	0,5788	0,5788
	0,6511104	0,65111	0,6511	0,6511
	0,723456	0,72346	0,7235	0,7235
	0,7958016	0,7958	0,7958	0,7958

Taipuma				
	koe 1	koe 2	koe 3	keskiarvo
	0	0	0	0
	1,47	1,7	1,5	1,5567
	2,6	2,71	3,14	2,8167
	4,24	3,5	4,06	3,9333
	5,35	4,57	5,13	5,0167
	6,39	5,69	6,48	6,1867
	7,74	6,92	7,68	7,4467
	8,53	8,55	9,46	8,8467
	11,3	10,62	10,72	10,88
	14,62	13,42	13,45	13,83

Taipuma (mm)	Voima (kN)
0,00	0,000
1,56	0,217
2,82	0,289
3,93	0,362
5,02	0,434
6,19	0,506
7,45	0,579
8,85	0,651
10,88	0,723
13,83	0,796

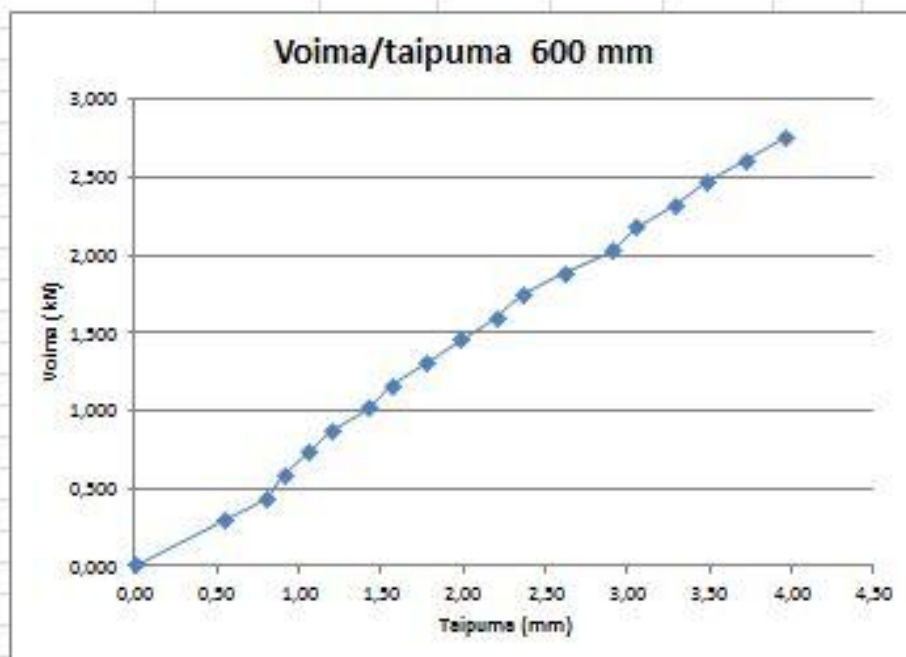
Voima/taipuma 1200 mm

Taipuma (mm)	Voima (kN)
0,00	0,000
1,56	0,217
2,82	0,289
3,93	0,362
5,02	0,434
6,19	0,506
7,45	0,579
8,85	0,651
10,88	0,723
13,83	0,796

[illegible]



Taipuma (mm)	Voima (kN)
0,00	0,000
0,53	0,289
0,79	0,434
0,90	0,579
1,05	0,723
1,20	0,868
1,42	1,013
1,56	1,158
1,77	1,302
1,98	1,447
2,19	1,592
2,35	1,736
2,61	1,881
2,90	2,026
3,05	2,170
3,28	2,315
3,47	2,460
3,71	2,604
3,95	2,749



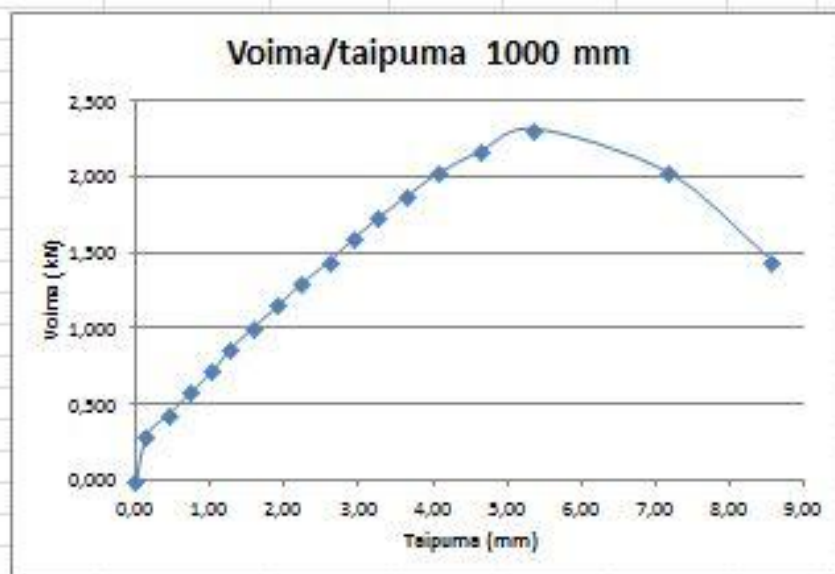
[illegible]



Mittauspöytäkirja

11/13

Taipuma (mm)	Voima (kN)
0,00	0,000
0,14	0,289
0,44	0,434
0,74	0,579
1,04	0,723
1,28	0,868
1,60	1,013
1,93	1,158
2,25	1,302
2,62	1,447
2,93	1,592
3,28	1,736
3,67	1,881
4,09	2,026
4,65	2,170
5,38	2,315
7,18	2,026
8,57	1,447





Mittauspöytäkirja

12/13

LUNDELL OY		Y-suunta		1200 mm	
	Taipuma (mm)	Paine (Ba)	Voima (N)	Voima (kN)	
	0	0	0	0	
	1,51	4	289,38	0,2894	
	1,8	6	434,07	0,4341	
	2,34	8	578,76	0,5788	
	2,72	10	723,46	0,7235	
	3,08	12	868,15	0,8681	
	3,51	14	1012,8	1,0128	
	3,85	16	1157,5	1,1575	
	4,26	18	1302,2	1,3022	
	4,71	20	1446,9	1,4469	
	5,24	22	1591,6	1,5916	
	5,57	24	1736,3	1,7363	
	6,1	26	1881	1,881	
	6,68	28	2025,7	2,0257	
	8,22	28	2025,7	2,0257	
	9,37	20	1446,9	1,4469	
	10,61	18	1302,2	1,3022	
	12,11	16	1157,5	1,1575	



Mittauspöytäkirja

13/13

Taipuma (mm)	Voima (kN)
0	0
1,51	0,28938
1,8	0,43407
2,34	0,57876
2,72	0,72346
3,08	0,86815
3,51	1,01284
3,85	1,15753
4,26	1,30222
4,71	1,44691
5,24	1,5916
5,57	1,73629
6,1	1,88099
6,68	2,02568
8,22	2,02568
9,37	1,44691
10,61	1,30222
12,11	1,15753

